

强地表冲击荷载下矩形地下混凝土结构振动 安全性评价方法

王国波¹, 殷 耀¹, 岑欣欣¹, 谢伟平², 季 杉², 郅嘉琳³

(1. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035; 2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;
3. 中建三局集团华南有限公司, 广东 广州 510600)

摘要: 混凝土地下结构广泛应用于工程实际,但其在地表强冲击荷载下的振动安全评价方法有待完善。本文归纳总结已有国内外振动安全评价方法,基于已有的数值方法,进行关键影响因素的参数分析,包括冲击块体积、高度、数量、位置以及地下结构形式和埋深,建议了不同场地类别条件下矩形混凝土地下结构简单实用振动安全评价方法。研究表明:不同规范对地下结构振动安全的评价指标存在较大差异,且大多基于爆破工程或大量的实测数据统计,缺乏理论依据;场地土类别对地下结构振动安全具有显著的影响,因此必须依据场地土类别建议对应的地下结构振动安全阈值;地下结构振动速度与对应地表点的振动速度具有较好的线性关系,因此不便于获取地下结构振动速度时,可采用对应地表点的振动速度进行安全评价。

关键词: 地下结构; 冲击荷载; 振动速度; 安全评价

中图分类号: TU93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)05-1048-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.05.002

引 言

城市地下结构在城市整体功能中发挥着越来越重要的功能,如地铁车站、隧道、石油管道、燃气管道等,其在运营期的安全性直接决定了城市功能能否正常运转。因此,城市地下结构在运营期的安全性必须引起足够的重视。在城市化进程迅速的大背景下,城市地下结构面临诸多方面的不确定性威胁,如邻近结构施工所进行的强夯、爆破拆除的塌落触地振动、重载车辆的碾压等。目前虽然已有相关的地下结构保护规范,但相关规定缺乏必要的理论依据,例如规范^[1-3]规定地表施工引起的地下结构的振动速度不能超过 2.5 cm/s,但已有的工程实测数据表明地表冲击荷载引起的地下结构振动速度不足 1.0 cm/s,远小于规范限值,却依然造成了地下结构的破损。由此可见,目前在这方面的理论研究与工程实际仍有一定的脱节,强地表冲击荷载引起的振动传播规律及其对地下结构的影响机理还不够明确,导致规定的阈值缺乏理论依据。

国内外许多学者对地下结构在地表冲击荷载下的动力响应及其安全性进行了研究。

在桩基施工振动方面:李怡闻等^[4]基于某工程

实例,分析了打桩对邻近隧道的影响,建议了打桩参数。余艳华等^[5]通过现场微震试验,分析了桥梁桩基施工振动对邻近埋地管道的影响,采用地表振动速度作为评价指标,并建议了振动影响区域。张龙等^[6]基于现场测试数据和数值分析,研究了近海工程沉桩振动对邻近埋地管道安全运行的影响,建议埋地管道的振动速度不能超过 10 mm/s。尹洪桦等^[7]基于某工程实际,探讨了钢管桩施工振动对邻近既有隧道的影响,建议了合理的打桩顺序和影响范围。宋春生等^[8]在总结国内外振动评价标准的基础上,分析了冲击钻孔振动对埋地天然气管道的影响,建议取地表质点振动速度 10 mm/s、最大不超过 12 mm/s 作为冲击钻孔振动对埋地天然气管道的安全阈值。Saylom^[9]分析了冲孔施工产生的冲击荷载及其对临近管廊安全性的影响,建议了合理施工范围。Hamidi 等^[10]以质点峰值振动速度(Peak Particle Velocity, PPV)为评价指标,建议了不同工况下打桩的安全距离。

在地表结构物倒塌触地冲击振动方面:文献[11-13]基于现场测试和模型试验,分析了烟囱以及城市高架桥爆破拆除时触地冲击荷载的特性及其对邻近地下管道的影响。黄栋等^[14]利用侵彻力计算公式,对风机倒塌的冲击力和冲击深度进行估算,分析

了冲击荷载作用下管道的应力应变响应,给出了安全性评价方法。熊健等^[15]建立了崩塌落石冲击荷载作用下埋地管道的三维有限元模型,分析了一些关键因素对埋地管道安全的影响。Baziar等^[16]探讨了地表冲击荷载作用下隧道结构的振动响应,结果表明影响地下结构振动响应的主要因素是冲击物传递给土层的冲量。Yang等^[17]研究了落石冲击作用下隧道的接触力、位移、损伤和能量分布。黄小武等^[18]研究了坍塌触地振动作用下盾构隧道管片的振动响应,结果表明管片结构对低频的触地振动比较敏感。

在建筑机械施工方面:李萍等^[19]基于最大应变计算方法,研究了碎石化施工时埋地管道应力随破碎机械距离、管道埋置深度的变化规律及管道的临界破坏条件。李辉山等^[20]以多锤头破碎机械为研究对象,分析了冲击波的传递规律及其对污水管(玻璃钢加砂管)的安全影响,建议了合理的管道埋置深度。Svinkin^[21]在总结归纳已有振动评价标准的基础上,从考虑土-结构相互作用、土层参数、结构特性等角度,建议了具有针对性的不同情况下振动评价阈值。

在强夯引起的冲击振动方面:赵师平等^[22]探讨了夯击能量、夯锤间距以及管道埋深等因素下,强夯冲击荷载作用对埋地输气管道动力响应的规律,得出了埋地输气管道在夯击荷载下的动力响应规律。韩传军等^[23]分析了埋地管道在夯击过程中管道截面变形及所受冲击力变化规律,研究了管道壁厚、夯击速度及夯锤体积对管道应力、应变及变形的影响规律。董飞飞等^[24]基于模型试验结果给出了地表冲击荷载作用下管道应变响应特点。

从上述已有研究来看,目前在桩基施工振动、塌落物的冲击振动、建筑机械施工、强夯等较为常见的地表强冲击荷载方面的研究较多,且大多集中在冲击荷载下地下结构动力响应方面,部分涉及到振动安全评价方法。但总的来看,大部分的研究还停留在具体工程上,由此得到的结论缺乏一般性,包括安全施工距离和振动评价阈值等,尤其是在振动安全评价阈值上,仍存在较大的争议。本文则期望在课题组前期已完成的部分工作基础上^[25],对强地表冲击荷载作用下地下结构振动安全评价方法做一些有益的探讨,使其具有可操作性。

1 国内外相关标准

虽然国内外目前已颁布了一系列的标准或法规,但他们大多是对实际工作状态的振动进行测量或做调查统计分析的结果,不是通过较为严密的理

论分析而得到的真正的容许振动。在强地表冲击荷载作用下,人们对结构的动力响应及其破坏机理的认识更为肤浅,各国或各行业之间在振害的评价指标及量化方面尚存在较大的差异^[26]。

1.1 国内相关标准

目前还没有专门的关于地表强冲击荷载对地下设施(管道、隧道、综合管廊、地铁车站等)影响评价的相关规范,评价时一般借用《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[27],采用振动峰值速度作为评价指标,如表1所示(限于篇幅,为部分节选)。

表1 爆破振动安全允许标准(节选)

Tab. 1 Blasting vibration safety allowable standards (Excerpt)

保护对象类别	安全允许质点振动速度 $V/$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	$f < 10 \text{ Hz}$	$10 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$	$f > 50 \text{ Hz}$
一般民用建筑物	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~30
工业和商业建筑物	2.5~3.5	3.5~4.5	4.2~5.0
一般古建筑与古迹	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5
水工隧洞	7~8	8~10	10~15
交通隧道	10~12	12~15	15~20
矿山巷道	15~18	18~25	20~30

由表1可见,规定的振动速度限值随着振动频率的增加而增大,这是因为高频振动成分在介质中衰减迅速,因此其影响程度逐渐降低。但《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[27]是针对爆破荷载而确定的阈值,强地表冲击荷载属于非爆破振动,二者在振动特性,尤其是频率特性上完全不同:冲击荷载属于低频振动,而爆破荷载属于高频振动,因此借用爆破安全规程的合理性值得商榷。

中国的行业标准《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[1]以及地方标准《城市轨道交通既有结构保护技术规范》(DJB/T 15-120—2017)^[2]和《地铁保护区内岩石爆破施工技术规范》(DGJ 32/TJ 181—2015)^[3]均规定城市轨道交通结构的安全允许最大振速为2.5 cm/s,实际使用时考虑到城市轨道交通的重要性,一般取2.0 cm/s或更低。但2.5 cm/s的振动速度阈值依然来自爆破安全规程,而且该数值的取值也比较经验化。《地铁保护区内岩石爆破施工技术规范》(DGJ 32/TJ 181—2015)^[3]条文说明中明确指出,混凝土破坏的质点振动速度约为15 cm/s,但因地层条件有许多不确定因素,一般取安全系数为10来设定控制阈值,则振动速度控制阈值建议为2~4 cm/s。

《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[28]对评价交通振动和建筑施工振动(打桩、振

冲、强夯)的影响给出了较为明确的要求,相应的具体限值如表2所示。

表2 《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—2013)^[28]规定的三类振动速度阈值(单位:mm/s)

Tab. 2 Three kinds of vibration velocity thresholds specified in *Standard for allowable vibration of building engineering* (GB 50868—2013)^[28] (Unit:mm/s)

建筑物类型	交通荷载				打桩和振冲等施工				强夯施工		
	顶层楼面		基础处		顶层楼面		基础处		顶层楼面		基础处
	1~100 Hz	1~10 Hz	50 Hz	100 Hz	1~100 Hz	1~10 Hz	50 Hz	100 Hz	1~100 Hz	1~10 Hz	50 Hz
工业建筑、公共建筑	10	5	10	12.5	12	6	12	15	24	12	24
居住建筑	5	2	5	7	6	3	6	8	12	5	12
对振动敏感、具有保护价值、不能划归上述两类的建筑	2.5	1	2.5	3	3	1.5	3	4	6	3	6

由表2可见:

(1)该规范较为全面,囊括了交通振动荷载、打桩和振冲荷载、强夯等,且以结构振动速度作为评价量,考虑的频率区间为1~100 Hz,同时考虑了结构不同部位的影响:结构顶层和基础。

(2)相较于交通荷载,该规范对建筑施工振动要求相对较低,特别是对强夯时结构的振动速度限值提高了约2倍。其原因在于建筑施工是短时的强冲击荷载,而交通荷载则属于长期的振动荷载。

(3)强夯振动为短时强冲击荷载,且属于低频振动,因此将频率范围由1~100 Hz降低到1~50 Hz。

(4)相比较于《爆破安全规程》(GB 6722—2014)^[27],该规范对于交通荷载和施工荷载所对应的振动速度限值小很多。

考虑到地表冲击荷载的特点,人们便考虑冲击荷载与机械荷载之间的关联性,例如冲击钻孔、强夯等冲击型振动与落锤式机械运动较类似,提出按机械振动相关规定作为施工冲击振动荷载影响的评判标准。《机械工业环境保护设计规范》(GB 50894—2013)^[29]规定对“有纪念性的建筑和古建筑物振动限值定位3~5 mm/s”,该规定成了后续相关规范限值的依据,在实际工程中应用较为广泛,但未提及对地下结构振动安全的评价。

《桩基工程手册》^[30]中对于预制桩的锤击和振动沉桩施工给出了相关要求,认为人体感受到振动的速度约为0.12~0.16 mm/s,并规定地基土质点的竖向振动速度宜小于2 mm/s,水平向振动速度宜小于10 mm/s,否则会导致结构的粉刷层开裂与剥落。

此外,同为以低频振动为主的荷载激励,强地表冲击荷载与地震动具有一定的相似性,两者均

基于结构安全性考虑。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定6度及以上的地区结构必须进行抗震设计,即低于6度(5度及以下)地区的结构不需要进行抗震设计。说明此振动水平不会对结构造成实质性的破坏,故可以5度区的峰值速度作为振动速度的阈值。根据《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)的相关规定:5度区地表水平峰值速度为2~4 cm/s。但考虑到强地表冲击荷载与地震动的振动特性仍存在差距,该规定只给出了地表水平向振动速度限值,因此该方法只能作为参考。

1.2 国外相关标准

国际标准中ISO系列较为成熟,但该系列中相关标准主要是从结构加速度响应角度考虑,以加速度峰值或加速度级作为评价指标,因此本节不以该规范作为研究的参考。应用比较广泛的是瑞士标准(SN 640312—1992)^[31],该标准考虑两种不同的振源:机械、交通和施工设备(用M表示)以及冲击荷载(用S表示)。除此之外,欧洲、美国、加拿大等的标准也较为成熟,相关阈值列于表3中^[10]。

由表3可见:

(1)欧洲规范和瑞士规范明确给出了针对地下设施或地下洞室与隧道的最大振动速度限值,但欧洲规范没有给出荷载频率范围,瑞士规范也只规定了10~30 Hz的范围,而冲击荷载一般属于低频振动,对低于10 Hz的振动没有规定;

(2)德国规范虽然给出了较为细致的频率分段,但没有明确给出地下设施的振动阈值;

(3)相较于国外规范,中国规范的要求更严苛。

表 3 防止结构损伤的瞬时振动最大允许 PPV 值^[10]
 Tab. 3 Maximum allowable PPV values for transient vibrations to prevent structural damage^[10]

规范	荷载频率范围/Hz	结构与条件	最大值/(mm·s ⁻¹)
Eurocode 3 (CEN 1993)	所有频率段	工业与商业框架结构	50
		埋置于地下的设施	40
		重型工业结构	30
		轻型商业结构	20
		住宅楼	10
		遗址和古文物建筑	4
German Standard DIN 4150-3 (DIN 1999)	0~10	商业-工业结构	20
	10~50		20~40
	50~100		40~50
	0~10	住宅楼	5
	10~50		5~15
	50~100		15~20
British Standard BS 7385-2 (BSI 1993)	0~10	敏感历史建筑物	3
	10~50		3~8
	50~100		8~10
British Standard BS 7385-2 (BSI 1993)	4~15	未加固的或轻框结构,住宅或轻商业型建筑	15~20
	>15		20~50
Swiss Standard SN640312 (SNV 1992)	10~30	钢或钢筋混凝土结构,包括厂房、挡土墙、桥梁、钢塔、明渠、地下洞室、隧道等	30.48
		基础和楼板为混凝土,墙为混凝土或砌体的挡土墙、地下洞室、隧道等	17.78
		上述建筑物中天花板为木头,墙体为砌体	12.7
		对振动非常敏感的历史建筑物	7.62
AASHTO (1990)	-	没有抹灰的建筑物结构	25.4~38.1
		墙板维护良好的住宅楼	10.16~12.7
		有抹灰的住宅楼	5.08~7.62
		历史建筑物	2.54

2 地下结构振动响应计算方法

由于本文重点在于振动安全评价方法的研究,具体的计算方法可参考作者已完成的对数值方法验证的文献[25],这里仅给出关键信息。计算模型示意图如图 1 所示。

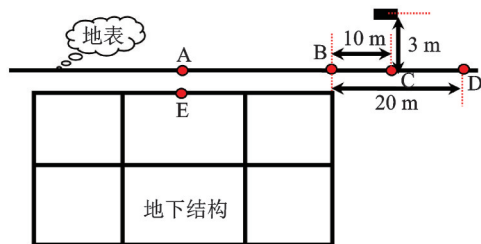


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Calculation model diagram

计算条件:以一定质量的刚性块体从一定高度自由落体落下冲击地表(C点),监测地表测点A(地下结构正上方)、点B(对应地下结构边墙),以及地

下结构顶板处点E。

计算模型:

(1)计算范围:计算宽度依据地下结构的尺寸确定,一般取地下结构横向宽度的 7 倍,深度依据地质资料取至基岩面。

(2)阻尼设置:土体阻尼采用经典瑞利阻尼模型。

(3)计算参数:土体参数参见表 4 中四类土体参数,而结构参数选取常见 C30 混凝土参数,即弹性模量为 30 GPa,密度为 2500 kg/m³,泊松比为 0.3;土体采用摩尔库伦模型,混凝土结构采用弹性模型。

(4)网格划分:采用梁单元模拟结构,平面单元划分土体,其中为使振动波能在土体内传播,网格尺寸一般小于波长的 1/10。

(5)边界条件:由于只考虑重力荷载,边界条件为约束四个侧面竖向自由度,模型底面设为固定边界。

(6)计算步骤:具体的计算共分为三个分析步骤:第一步添加全局重力场并平衡地应力;第二步进行土体开挖,放入地下结构并设置地下结构外表面

与土体的“tie”接触;第三步进行 ABAQUS 隐式动力分析,考虑冲击块的落下冲击。

3 地下结构振动安全评价方法

地下结构在地表冲击荷载作用下的振动安全评价方法研究滞后于地表结构。目前对于冲击荷载的影响研究,主要集中于内爆(内部爆炸,恐怖袭击)和外爆(人防荷载)等方面,而对于打桩、强夯、路面碾压等强地表冲击荷载的研究还略显不足。

对结构安全进行评价,无非是从结构受力和变形两个方面入手。本文暂时主要针对地下混凝土结构进行研究,由于混凝土结构的抗拉强度很低,地下结构在瞬时冲击荷载下的变形一般很小,地下混凝土结构的拉应变便成为结构安全的控制因素。因此,本文拟通过地下混凝土结构最大振动速度与相应拉应变关系,依据混凝土结构最大拉应变确定最大容许振动速度。

考虑到地下结构埋置于土体之中,地表冲击荷载引起的振动须通过土介质的传播才能到达地下结构,因此土层条件也是一个至关重要的因素。据此,参照中国的抗震设计规范将场地土划分为四类,四类土的计算参数如表 4 所示。

另外,考虑到某些特殊的地下结构(如石油管道)不允许对其开挖后埋设监测点,从而需要通过间接的指标对其进行安全性判断,比如邻近地表的振动速度。

表 5 不同场地土类别、各工况下地下结构最大振动速度(单位:cm/s)

Tab. 5 Maximum vibration velocity of underground structures under different site soil types and working conditions(Unit: cm/s)

影响因素	工况信息	I 类场地		II 类场地		III 类场地		IV 类场地	
		振动速度	最大拉应变	振动速度	最大拉应变	振动速度	最大拉应变	振动速度	最大拉应变
	标准工况	1.02	8.74×10^{-5}	1.18	8.27×10^{-5}	1.32	7.79×10^{-5}	1.45	6.79×10^{-5}
冲击块体积	2 m^3	1.13	1.11×10^{-4}	1.29	9.75×10^{-5}	1.53	8.37×10^{-5}	1.61	7.99×10^{-5}
	3 m^3	1.68	2.75×10^{-4}	2.61	3.23×10^{-4}	2.73	3.91×10^{-4}	2.94	3.23×10^{-4}
冲击块高度	5 m	1.11	1.02×10^{-4}	1.51	1.08×10^{-4}	1.80	1.00×10^{-4}	2.01	1.02×10^{-4}
	7 m	1.53	2.39×10^{-4}	1.59	1.42×10^{-4}	2.16	2.56×10^{-4}	2.73	3.01×10^{-4}
冲击块数量	2 个,高度均为 3 m	1.17	1.23×10^{-4}	2.07	2.02×10^{-4}	2.24	2.78×10^{-4}	2.48	2.87×10^{-4}
	2 个,高度 3 m 和 6 m	1.74	2.89×10^{-4}	2.14	2.38×10^{-4}	2.84	4.14×10^{-4}	2.14	2.32×10^{-4}
距车站距离	冲击点 B 点	1.19	1.26×10^{-4}	1.25	9.61×10^{-5}	1.49	8.08×10^{-5}	1.58	7.86×10^{-5}
	冲击点 D 点	0.34	5.22×10^{-5}	0.41	4.67×10^{-5}	0.63	3.71×10^{-5}	0.81	3.18×10^{-5}
地下结构形式	双层单跨	1.09	9.98×10^{-5}	1.33	9.84×10^{-5}	1.58	8.42×10^{-5}	1.33	5.19×10^{-5}
	双层双跨	1.16	1.20×10^{-4}	1.27	9.68×10^{-5}	1.49	8.33×10^{-5}	1.27	4.82×10^{-5}
地下结构埋深	5 m	0.47	6.77×10^{-5}	0.54	6.21×10^{-5}	0.77	3.14×10^{-5}	0.54	1.34×10^{-5}
	7 m	0.32	5.19×10^{-5}	0.38	4.48×10^{-5}	0.54	2.27×10^{-5}	0.38	1.02×10^{-5}

表 4 四类土的计算参数

Tab. 4 Calculation parameters of four kinds of soil

场地类别	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比
场地 I 软弱土 ($c_s \leq 150 \text{ m/s}$)	1600	100	0.45
场地 II 中软土 ($150 \text{ m/s} < c_s \leq 250 \text{ m/s}$)	1700	200	0.42
场地 III 中硬土 ($250 \text{ m/s} < c_s \leq 500 \text{ m/s}$)	1800	400	0.40
场地 IV 坚硬土 ($500 \text{ m/s} < c_s \leq 800 \text{ m/s}$)	2000	600	0.35

注:表中 c_s 为土层剪切波速。

因此,本节从地下结构强度和地下结构对应地表振动速度两方面,探讨地下结构在地表冲击荷载下的安全判定依据。

3.1 从地下结构强度出发

基于大量数值计算分析,得到每个工况下地下结构竖向振动速度与其最大应变,对计算得到的数据进行拟合分析,确定二者之间的经验关系式。然后将达到容许应变时所对应的振动速度作为振动速度阈值。

本文定义标准工况, 1 m^3 的混凝土块从 3 m 高处自由落下,冲击点位置为距离车站的边墙水平距离为 10 m(C 点),车站埋深为 3 m。本文定义标准工况纯粹是为了便于对比分析,因为其他工况只是在标准工况的基础上改变某单一参数。不同场地土类型、不同工况下的计算结果如表 5 所示。

考虑到混凝土的拉应变限值为一般为 $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-4}$, 本文较为保守地取下限值 1.0×10^{-4} 作为极限拉应变, 即认为地下结构的最大拉应变大于该限值后, 混凝土将会开裂, 这是不允许发生的。

由表 5 的后两列可得如图 2 所示关于振动速度与最大拉应变之间的拟合关系曲线。由图 2 及表 5 可见:

(1) 土层条件越好, 一方面其阻尼越小, 则振动能量的耗散越少; 另一方面, 土体对地下结构的约束越强, 地下结构的变形则较小。因此, 土层条件越好, 结构的变形越小, 结构的振动速度越大。

(2) 对四类土体进行类似的回归分析, 取混凝土拉应变容许值为 1.0×10^{-4} 时对应的振动速度, 可得各类场地土条件下地铁车站结构的振动速度限值: I 类场地土 1.12 cm/s, II 类场地土 1.45 cm/s, III 类场地土 1.55 cm/s, IV 类场地土 1.75 cm/s。

(3) 以上计算结果均远小于目前《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202-2013)^[1] 中给出的限值 2.5 cm/s。由此可见, 地表冲击荷载对临近地下结构的影响不容忽视, 且不能套用爆破方面的限值。

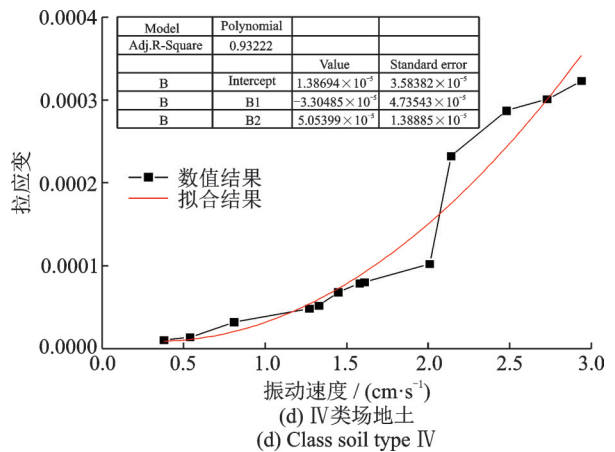
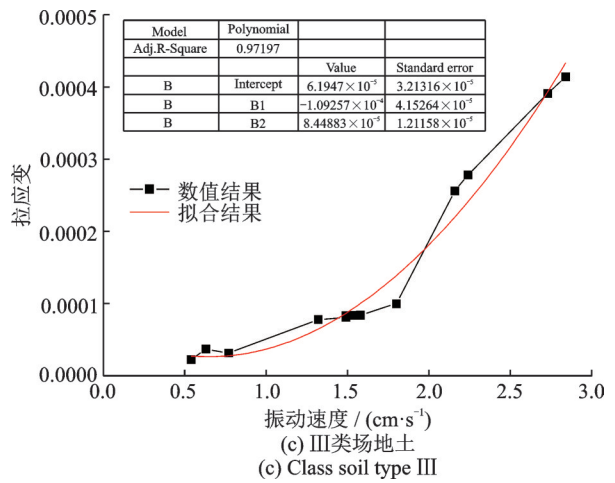
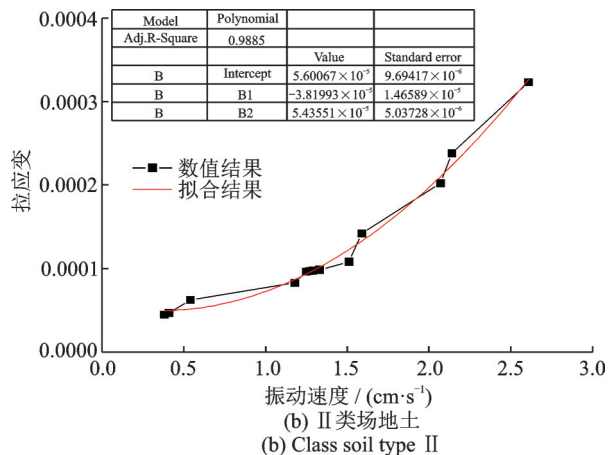
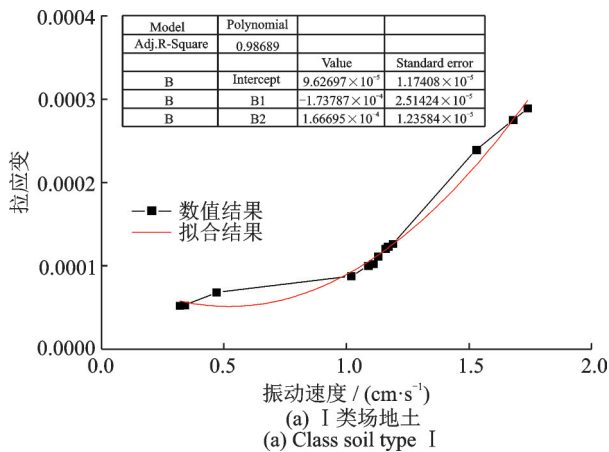


图 2 不同场地土类别时地下结构振动速度与最大拉应变关系拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of relationship between vibration velocity and maximum tensile strain of underground structure under different site soil types

3.2 对应地表土体振动速度之间的对应关系

由于地下结构的隐蔽性以及功能特殊性, 对于已经建成的地下结构, 很难甚至不可能直接在结构上设置监测点, 只能采用间接方法。考虑到地下结构受周围土体束缚, 振动时地下结构随着土体一起振动, 二者在振动速度上有一定的关联性。因此, 通过研究地下结构上方地表土体的振动速度与地下结构振动速度之间的关系, 从而能够由地表振动速度间接推算地下结构的振动速度, 达到对地下结构进行安全评价的目的。不同场地土及各工况下地下结构顶板最大振动速度与其正上方对应地表点最大振动速度如表 6 所示, 拟合分析得到的关系曲线如图 3 所示。

由表 6 及图 3 中拟合曲线可以看出, 地下结构最大振动速度与对应地表土体的最大振动速度有较好的线性关系, 通过地表土体的振动速度推断地下结构的振动速度是可行的。四类场地土的拟合关系如下式所示:

表6 地下结构最大振动速度与对应地表点振动速度(单位:cm/s)

Tab. 6 Maximum vibration velocity of underground structure and corresponding vibration velocity of surface point(Unit:cm/s)

影响因素	工况信息	I类场地		II类场地		III类场地		IV类场地	
		振动速度	地表A点速度	振动速度	地表A点速度	振动速度	地表A点速度	振动速度	地表A点速度
	标准工况	1.02	1.14	1.32	2.42	1.18	2.01	1.32	2.69
冲击块体积	2 m ³	1.13	1.25	1.53	2.67	1.29	2.12	1.53	3.14
	3 m ³	1.68	1.76	2.73	3.99	2.61	3.77	2.73	5.54
冲击块高度	5 m	1.11	1.22	1.80	2.87	1.51	2.68	1.80	3.67
	7 m	1.53	1.67	2.16	3.44	1.59	2.57	2.16	4.29
冲击块数量	2个,高度均为3 m	1.17	1.29	2.24	3.63	2.07	3.11	2.24	4.57
	2个,高度3 m和6 m	1.74	1.88	2.84	3.96	2.14	3.21	2.84	5.71
距车站距离	冲击点B点	1.19	1.33	1.49	2.54	1.25	2.37	1.49	3.05
	冲击点D点	0.34	0.48	0.63	1.75	0.41	1.51	0.63	1.38
地下结构形式	双层单跨	1.09	1.20	1.58	2.73	1.33	2.45	1.58	3.25
	双层双跨	1.16	1.28	1.49	2.61	1.27	2.36	1.49	3.04
地下结构埋深	5 m	0.47	0.59	0.77	1.94	0.54	1.61	0.77	1.54
	7 m	0.32	0.45	0.54	1.61	0.49	1.09	0.54	1.22

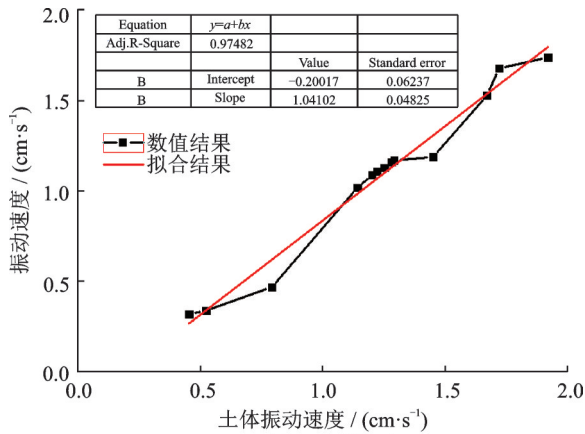
I类场地土: $V_{structure} = 1.04V_{soil} - 0.20$ (1)

II类场地土: $V_{structure} = 0.76V_{soil} - 0.04$ (2)

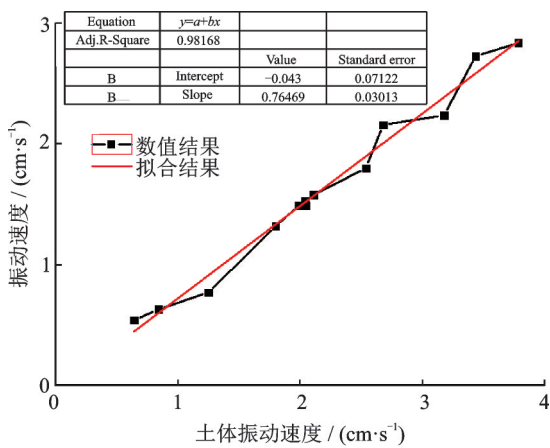
III类场地土: $V_{structure} = 0.92V_{soil} - 0.83$ (3)

IV类场地土: $V_{structure} = 0.51V_{soil} - 0.08$ (4)

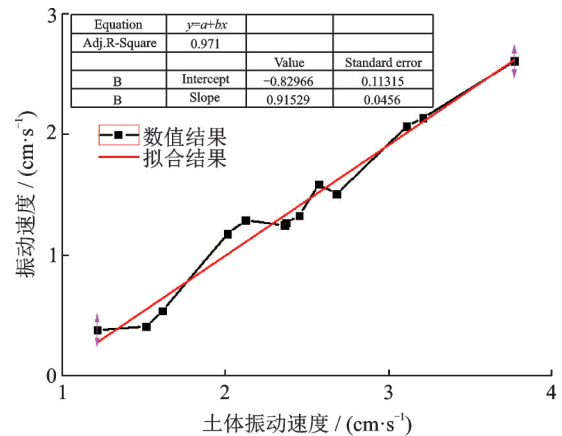
利用上述第一种方法(基于强度的方法)确定



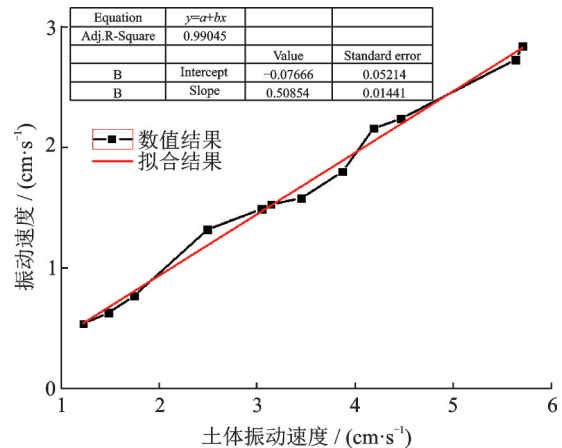
(a) I类场地土
(a) Class soil type I



(b) II类场地土
(b) Class soil type II



(c) III类场地土
(c) Class soil type III



(d) IV类场地土
(d) Class soil type IV

图3 地下结构最大振动速度与对应地表点振动速度的拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of maximum vibration velocity of underground structure and vibration velocity of corresponding surface points

的地下结构最大振动速度值,代入公式(1)~(4),反算得到地下结构正上方对应地表振动速度阈值分别为:1.21, 2.32, 2.51 和 3.59 cm/s。由此可以看出:

(1)地表质点的振动速度一般大于一定埋深的地下点的振动速度;

(2)随场地土由软到硬(类型由 I 到 IV),地表振动速度阈值不断提高。

3.3 建议的评价方法

对于工程预评估和理论分析,可直接利用上述第一种方法中确定的不同类型场地土中地下结构的振动速度阈值进行评价。

对于一些实际工程的评价,如果无法和不易直接获取地下结构的振动速度,可监测得到地下结构对应地表点的振动速度进行振动安全评价。

4 结束语

本文在总结归纳国内外已有相关地下结构振动安全评价标准和规范的基础上,对地表冲击荷载作用下地下结构的振动安全评判准则进行了探讨,得到如下主要结论:

(1)目前的国内外规范和标准基本上选用振动速度作为评价指标,但在阈值上存在较大差异,且基本上参照爆破规范,不尽合理。

(2)场地土类别直接决定了地下结构振动安全评价阈值,根据地下结构最大振动速度与其对应的应变峰值关系曲线,确定了四种场地土中地下结构的最大振动速度阈值: I 类场地土 1.12 cm/s, II 类场地土 1.45 cm/s, III 类场地土 1.55 cm/s, IV 类场地土 1.75 cm/s。

(3)地下结构振动速度与对应地表振动速度线性相关,对于不方便获取地下结构振动速度的工程,可以用对应地表点最大振动速度作为评价地下结构振动安全的阈值: I 类场地土 1.12 cm/s, II 类场地土 2.32 cm/s, III 类场地土 2.51 cm/s, IV 类场地土 3.59 cm/s。该方法具有简单实用的特点。

本文虽然基于大量的计算分析建议了一种简单实用的地下结构振动安全评价方法,但本文的研究也存在一些不足,如本文的标题直接限定为地下混凝土结构,主要是考虑混凝土结构的抗拉强度是其控制指标,而目前大多石油管道等特殊地下设施是钢或其他材料,其振动安全评价阈值尚需进一步探讨。另外,对于地下结构形状(圆形、方形、不规则)以及管道中如有内压或流体等因素,也未考虑在内。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202-2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for safety protection of urban rail transit structures: CJJ/T 202-2013[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.
- [2] 广州地铁集团有限公司.城市轨道交通既有结构保护技术规范: DBJ/T 15-120-2017[S].北京:中国城市出版社,2017.
Guangzhou Metro Group Co. Ltd.. Technical specification for protection of existing structures of urban rail transit: DBJ/T 15-120-2017[S]. Beijing: China City Press, 2017.
- [3] 南京市城市建设投资控股(集团)有限责任公司,南京市地铁建设有限责任公司.地铁保护区内岩石爆破施工技术规程: DGJ32/TJ 181-2015[S].南京:江苏凤凰科学技术出版社,2015.
Nanjing Urban Construction Investment Holding (Group) Co., Ltd., Nanjing Metro Construction Co., Ltd.. Technical regulations for rock blasting construction in metro protection area: DGJ32/TJ 181-2015[S]. Nanjing: Jiangsu Phoenix Science and Technology Press, 2015.
- [4] 李怡闻,周健.土-结构动力相互作用分析打桩引起相邻隧道振动[J].岩土工程学报,2007,29(1):60-65.
Li Yiwen, Zhou Jian. Analysis of tunnel vibration due to pile driving under soil-structure dynamic interaction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 60-65.
- [5] 余艳华,苏华友.桥梁桩基施工振动对邻近埋地管道影响试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2014,33(2):35-39.
She Yanhua, Su Huayou. Influence of bridge pile construction vibration on adjacent buried pipeline [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2014, 33(2): 35-39.
- [6] 张龙,诸裕良.近海工程沉桩振动对邻近埋地管道影响的数值模拟和现场监测[J].江南大学学报(自然科学版),2015,14(1):97-102.
Zhang Long, Zhu Yuliang. Numerical simulation and field monitoring of offshore engineering pile driving vibration on adjacent buried pipeline [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2015, 14(1): 97-102.
- [7] 尹洪桦,尹洪冉,胡明华,等.钢管桩施工对邻近既有隧道的动力响应分析[J].四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(1):76-81.
Yin Honghua, Yin Hongran, Hu Minghua, et al. Analysis of dynamic response of steel pipe piles construction

- on adjacent existing tunnel[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2016, 29(1): 76-81.
- [8] 宋春生, 李鹏飞, 蒲传金. 冲击钻孔振动对埋地管道的安全判据探讨[J]. 天然气技术与经济, 2011, 5(1): 40-42.
Song Chunsheng, Li Pengfei, Pu Chuanjin. Safety criterion of percussive borehole vibration to buried pipeline[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2011, 5(1): 40-42.
- [9] Souvannala Saylom. 冲击钻孔振动对邻近埋地综合管廊的影响分析[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(1): 12-16.
Souvannala Saylom. Analysis of influence of vibration on the impact of drilling the adjacent buried pipe gallery [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2019, 26(1): 12-16.
- [10] Hamidi A, Rooz A F H, Pourjenabi M. Allowable distance from impact pile driving to prevent structural damage considering limits in different standards[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2018, 23(1): 04107029.
- [11] 龙源, 娄建武, 徐全军, 等. 爆破拆除烟囱时地下管道对烟囱触地冲击振动的动力响应[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(2): 38-42.
Long Yuan, Lou Jianwu, Xu Quanjun, et al. Subterranean pipeline's dynamic response to ground shock caused by demolished chimney[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(2): 38-42.
- [12] 王敏, 龙源, 钟明寿, 等. 爆破拆除塌落振动对浅埋金属管道动态响应的相似性研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 147-153.
Wang Min, Long Yuan, Zhong Mingshou, et al. Similarity study of dynamic response of shallow buried metal pipeline by building vibration in blasting demolition[J]. Blasting, 2018, 35(3): 147-153.
- [13] 钟明寿, 龙源, 刘影, 等. 城市高架桥塌落冲击地铁隧道结构的动态响应及防护技术[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 11-17.
Zhong Mingshou, Long Yuan, Liu Ying, et al. Dynamic response and protection technology research on metro tunnels under collapse vibration of city viaduct[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 11-17.
- [14] 黄栋, 赵宇, 陈宇龙, 等. 云顶风电场风机倒塌对埋地管道的冲击影响[J]. 振动与冲击, 2018, 37(8): 125-131.
Huang Dong, Zhao Yu, Chen Yulong, et al. Impact of wind turbine collapse in Yunding wind power station on buried pipeline [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(8): 125-131.
- [15] 熊健, 邓清禄, 张宏亮, 等. 崩塌落石冲击荷载作用下埋地管道的安全评价[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(1): 108-114.
Xiong Jian, Deng Qinglu, Zhang Hongliang, et al. Safety assessment on the response of buried pipeline caused by rockfall impact load [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(1): 108-114.
- [16] Baziari M H, Moghadam M R, Kim D S, et al. Effect of underground tunnel on the ground surface acceleration [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2014, 44(3): 10-22.
- [17] Yang L, Li S M, Chen D H, et al. Impact dynamics analysis of shed tunnel structure hit by collapse rock-fall[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99-100: 1023-1026.
- [18] 黄小武, 谢先启, 钟冬望, 等. 塌落触地振动对地铁管片结构的影响研究[J]. 爆破, 2016, 33(4): 135-139.
Huang X W, Xie X Q, Zhong D W, et al. Study on influence of impact vibration on subway segments structure [J]. Blasting, 2016, 33(4): 135-139.
- [19] 李萍, 张雅莉, 念腾飞, 等. 碎石化施工对邻近地下管道的振动影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(4): 134-138.
Li Ping, Zhang Yali, Nian Tengfei, et al. Influence of rock-crushing during pavement construction on vibration of adjacent buried pipelines [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(4): 134-138.
- [20] 李辉山, 刘汉青, 郝虎. 破碎压实技术对城镇道路地下管道的振动影响与安全评价[J]. 交通运输工程与信息学报, 2019, 9(3): 31-36.
Li Huishan, Liu Hanqing, Hao Hu. Vibration influence and security evaluation on buried pipeline of urban road for adopting breaking and impacting technology [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2019, 9(3): 31-36.
- [21] Svinkin M R. Tolerable limits of construction vibrations [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2015, 20(2): 04014028.
- [22] 赵师平, 曾祥国, 姚安林, 等. 第三方载荷作用下埋地输气管道动力响应的数值模拟[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(1): 134-139.
Zhao Shiping, Zeng Xiangguo, Yao Anlin, et al. Dynamic response numerical simulation of buried gas pipeline during third-party interference [J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(1): 134-139.
- [23] 韩传军, 张瀚, 张杰, 等. 地表夯击荷载作用下埋地管道力学分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 61-67.
Han Chuanjun, Zhang Han, Zhang Jie, et al. Mechanical analysis on buried pipeline under effect of surface tamping impact load [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(10): 61-67.
- [24] 董飞飞, 张东山, 田江平, 等. 冲击荷载作用下埋地长输管道动力响应研究[J]. 石油机械, 2020, 48(1): 132-141.
Dong Feifei, Zhang Dongshan, Tian Jiangping, et al. Study on dynamic response of buried long distance pipeline under impact load [J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(1): 132-141.

- [25] 王国波,殷耀,谢伟平,等.坍塌触地冲击荷载作用下地铁车站动力响应分析及其安全性评价[J].振动工程学报,2021,34(2):338-346.
Wang Guobo, Yin Yao, Xie Weiping, et al. Safety evaluation and dynamic response analysis of subway station under touchdown impact [J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 338-346.
- [26] 徐建.建筑振动工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
Xu Jian. Construction Vibration Engineering Manual [M].2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [27] 汪旭光,郑炳旭,张正忠,等.爆破安全规程:GB 6722—2014[S].北京:中国标准出版社,2015.
Wang X G, Zheng B X, Zhang Z Z, et al. Safety regulation for blasting: GB 6722—2014 [S]. Beijing: China Standards Press, 2015.
- [28] 中国机械工业联合会.建筑工程容许振动标准:GB 50868—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
China Machinery Industry Federation. Permissible vibration standard for construction engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [29] 张军锋,高洪澜,苏建华,等.机械工业环境保护设计规范:GB 50894—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
Zhang J F, Gao H L, Su J H, et al. Code for environmental protection design of machinery industry: GB 50894—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [30] 龚晓南.桩基工程手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
Gong Xiaonan. Pile Foundation Engineering Manual [M].2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2016.
- [31] Swiss Association for Standardization (SNV). Swiss standard for vibration in buildings: SN 640312—1992 [S]. Switzerland: Swiss Association for Standardization, 1992.

Safety evaluation method for vibration of rectangular underground concrete structure under strong surface impact load

WANG Guo-bo¹, YIN Yao¹, CEN Xin-xin¹, XIE Wei-ping², JI Shan², QIE Jia-lin³

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

2.School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3.China Construction Third Engineering Bureau Group South China Co. Ltd., Guangzhou 510600, China)

Abstract: Concrete underground structure is widely used in engineering practice, but its vibration safety evaluation method under surface strong impact load needs to be improved. The existing vibration safety evaluation methods at home and abroad are summarized in the paper. The parameter analysis of key influencing factors, including the volume, height, number, location of the impact block, and the form and depth of the underground structure, is carried out based on the existing numerical methods. A simple and practical vibration safety evaluation method for rectangular concrete underground structures under different site types is proposed. The results show that the evaluation indexes of vibration safety of underground structures in different codes are quite different, and most of them lack theoretical basis because they are based on blasting engineering or some statistical data. The site soil type has a significant impact on the vibration safety of underground structures. Therefore, the corresponding vibration safety threshold of the underground structure must be recommended according to the site soil type. The vibration velocity of underground structure has a good linear relationship with the vibration velocity of corresponding surface points. Therefore, when it is not easy to obtain the vibration velocity of underground structure, the vibration velocity of corresponding surface points can be used for safety evaluation.

Key words: underground structure; impact load; vibration velocity; safety evaluation

作者简介: 王国波(1979—),男,博士,教授。E-mail: wgb16790604@126.com。

通讯作者: 谢伟平(1965—),男,博士,教授。E-mail: wpxie@sina.com。