

上海市区区域工程场地剪切波地震稳定性评价

孙秀容, 刘志高, 许东儿, 戴纯俊

(上海申丰地质新技术应用研究所, 上海 200030)

摘要: 笔者利用单孔波速测试技术, 对上海市区区域工程场地作稳定性地质调查与评价。其评价指标主要为场地土类型及场地类别、场地液化势和场地地脉动卓越周期。资料表明, 市区-15 m 范围内区域工程场地土类型属软弱场地土, 为Ⅳ类建筑场地; 市区南部的场地地脉动卓越周期约为 0.65 s, 北部可达 0.8 s, 其它区域仅为 0.7 s; 市区西南部和苏州河流域在Ⅶ级地震条件下极易产生液化。

关键词: 稳定性评价; 区域工程场地; 剪切波

中图分类号: P631.4; TU4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2002)05-0398-05

上海是世界著名的国际大都市之一, 自“改革开放”以来, 进行了大规模扩建改造, 先后完成了“三纵三横”高架道路, 地铁一号线、二号线和轻轨明珠线, 以及东方明珠塔和金茂大厦等标志型高层建筑, 外环线和磁悬浮列车线则在计划实施中。为此, 进行工程场地地质调查及剪切波地震稳定性评价, 以了解场地土类型及场地类别、场地的液化势和场地的地脉动卓越周期等, 日益受到重视和关注。

1 工程地质概况

前人的地质资料表明, 上海市区的第四系厚度大于 200 m, 自古更新统至全新统发育齐全; 用于工业与民用建筑施工和建筑地基处理的工程地基土层厚达 120 m。吴淞—莘庄剖面地基土层资料显示, 自中更新世末期以来, 韵律清晰; 由于没有揭穿, 最底层沉积的沉积轮回是从粉砂层开始, 至粉质粘土层结束; 第二层自中砂层始至粘土层终; 第三层由粉砂层起始至粘土层止。全新世以来的土层沉积特点与下层不同, 仅有沉积轮回的后半段, 即缺失粗粒和中粒沉积物。其下亚层由粉砂层过渡到粘土层, 上亚层则展现出淤泥质粘土层上覆着砂质粉土层和粘性土层的特点。

上海地区的研究成果^[1]表明, 海侵时沉积物质岩性多为灰色的砂砾石, 反映了一个水下还原状态; 海退时沉积物质多为粘土物质, 呈现其出露地面时成土作用中有氧化铁的积聚与沉淀。原始沉积物在迁移、沉积过程中, 各种矿物发生重力分选作用, 由

下而上, 矿物粒径从大变小, 粘土矿物(悬浮沉积物)在上, 而岩屑(石英)在下, 构成这种沉积物质链所揭示的沉积轮回。沉积物层自然也构成了沉积韵律。

2 工程场地剪切波分层特征

由于各土层的沉积年代不同, 其土质颗粒度、孔隙度及密度等物理力学性质存在差异, 弹性波在各地层中的传播速度有所不同。弹性波的传播, 实质上是应力和应变在介质中的传播。其特性取决于介质受力状态和传播介质的物理力学性质, 如弹性模量 E_d 、剪切模量 G_d 和泊松比 μ 等。根据弹性波理论, 波在地层介质中传播时, 波速与岩土的物理力学参数有下列关系

$$\begin{aligned} v_p &= \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}, \\ v_s &= \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}, \\ G_d &= \rho v_s^2, \\ E_d &= 2\rho v_s^2(1+\mu), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, v_s 为横波波速, v_p 为纵波波速, ρ 为质量密度, E_d 为动弹性模量, G_d 为动剪切模量。

单孔波速测试技术就是建立在这一理论基础之上。在地面, 水平正、反方向敲击钉靶式激震板, 产生低频丰富的剪切波并向土层四周传播; 井中, 由抗干扰强、灵敏度高的三分量传感器接收并存储正、反向波形数据。土层的剪切波速度 v_s 直接与地层的

物理力学参数相关。弹性波初至时(T)拾取后先作斜距校正,再进行弹性波波速计算。

斜距校正公式为

$$T = KT_L,$$
$$K = \frac{H + H_0}{\sqrt{L_2 + (H + H_0)}}, \tag{2}$$

式中, T_L 为实测弹性波初至时, T 为经校正后的弹性波初至时, K 为斜距校正系数, H 为测点的深度, H_0 为震源与测试孔口的高差, L 为震源中心至测试孔的水平距离。

弹性波波速计算公式为

$$v_i = \frac{H_i - H_{i-1}}{T_i - T_{i-1}}; v = \frac{\Delta H}{\Delta T} \tag{3}$$

式中, v_i 为第 i 测点弹性波波速, H_i 、 H_{i-1} 为第 i 、第 $i-1$ 测点的深度, T_i 、 T_{i-1} 为第 i 、第 $i-1$ 测点校正后的弹性波初至时, v 为波速层平均弹性波波速, ΔH 为波速层厚度, ΔT 为弹性波传到波速层顶面和底面的时间差。

2.1 工程场地剪切波分层特征

上海市区的研究成果^[1,5]表明,自中更新世末期至全新世,上海市区曾发生过 4 次海侵,因此出现了 5 个表征为剪切波波速自高变低的沉积轮回(表

- 1):
- (1) 第一沉积轮回 波速依次为 402 m/s→386 m/s→(? m/s), 相应土性则为粉砂→粉质粘土→粘土。
 - (2) 第二沉积轮回 波速依次为 373 m/s→362 m/s→353 m/s→296 m/s, 对应土性则为中砂→粉、细砂→粉质粘土。
 - (3) 第三沉积轮回 波速依次为 396 m/s→310 m/s→201 m/s→248 m/s→235 m/s, 相应土性则为粉细砂→粉砂→砂质粉土→粉质粘土→粘土。
 - (4) 第四沉积轮回 波速依次为 294 m/s→233 m/s→194 m/s→190 m/s→143 m/s→129 m/s, 对应土性则为粉砂→粉质粘土→粉砂→粘土→淤泥质粘土→淤泥质粉质粘土。
 - (5) 第五沉积轮回 波速依次则为 150 m/s→122 m/s→113 m/s→103 m/s, 相应土性则为砂质粉土→砂质粉土→粉质粘土→粘土。

由表 1 可见,上海市区工程场地可分为以下 10 个波速层,自上至下为:

- (1) 第一波速层 波速变化为 99 ~ 103 m/s, 平均波速 102 m/s, 为砂质粉土—粘土—填土层, 厚度 2 ~ 4 m。

表 1 吴淞—莘庄剖面剪切波波速一览

地质时代	土层序号	土层名称	$v/(m \cdot s^{-1})$	浦西 $v/(m \cdot s^{-1})$	浦东 $v/(m \cdot s^{-1})$
全新世 Q_4	1	填土	101	103	99
	Q_4^3	2-1 粘土	103	103	
		2-2 粉质粘土	113	123	110
		2-3 砂质粉土	122	116	128
		3-2 砂质粉土	150	144	163
	Q_4^2	3-3 淤泥质粉质粘土	129	134	125
		4 淤泥质粘土	143	150	137
	Q_4^1	5-1 粘土	190	199	170
		5-2 粉砂	194	194	195
		5-3 粉质粘土	233	246	218
		5-4 粉砂(夹粉质粘土)	294	294	293
晚更新世 Q_3	Q_3^2	6-1 粘土	235	235	234
		6-2 粉质粘土	248	253	243
		7-1-1 砂质粉土	201		201
		7-1-2 粉砂	310	334	271
		7-2-2 粉细砂	396	396	
		8-2 粉质粘土	296	292	300
	Q_3^1	9-1-1 细砂	353	363	351
		9-1-2 粉砂	362	376	353
		9-2 中砂	373	377	371
		10-2 粉质粘土	386	404	380
中更新世	Q_2	11 粉砂	402	375	406

(2) 第二波速层 波速变化为 110 ~ 163 m/s, 平均波速 133 m/s, 为淤泥质粘土—淤泥质粉质粘土—粉质粘土层, 埋深 -4 ~ -6 m 以下;

(3) 第三波速层 波速变化为 170 ~ 266 m/s, 平均波速 204 m/s, 为粉质粘土—粉砂—粘土层, 埋深 -10 ~ -17 m 以下;

(4) 第四波速层 波速变化为 234 ~ 253 m/s, 平均波速 242 m/s, 为粉质粘土—粘土层, 埋深 -24 m ~ -46 m 以下;

(5) 第五波速层 平均波速 201 m/s, 为砂质粉土层, 埋深 -27 ~ -54 m 以下。

(6) 第六波速层 波速变化为 271 ~ 334 m/s, 平均波速 310 m/s, 为粉砂层, 埋深 -34 ~ -60 m 以下;

(7) 第七波速层 平均波速 396 m/s, 为粉细砂层, 埋深 -30 ~ -39 m 以下;

(8) 第八波速层 波速变化为 292 ~ 300 m/s, 平均波速 296 m/s, 为粉层粘土层, 埋深 -49 ~ -63 m 以下;

(9) 第九波速层 波速变化为 351 ~ 377 m/s, 平均波速 366 m/s, 为中砂—粉、细砂层, 埋深 -60 ~ -88 m 以下;

(10) 第十波速层 波速变化为 375 ~ 406 m/s, 平均波速 391 m/s, 为粉砂—粉质粘土层, 埋深 -90 m 以下;

吴淞—莘庄剖面场地剪切波波速测试成果, 大致反映出上海市区某一结构土体在动力作用下的动变形特征。其影响因素较为复杂, 包括地下水饱和度、沉积地质环境、土颗粒特性(孔隙度、密实度)

等。由此可见, 波速总体上随深度呈阶梯状增大, 仅在第一与第二波速层间、第三与第四波速层间、第四与第五波速层间和第七与第八波速层间出现降低台阶。

2.2 地表以下 15 m 范围内土层剪切波分层特征

由于城市工程建设上的原因, 地表以下 15 m 范围内土层的物理力学性质, 尤其引起人们的注意。根据剪切波波速结构特点(表 2), 分层如下:

(1) 2-1 粘土层平均波速较低, 仅 103 m/s 左右, 主要分布于市区西南部。

(2) 2-3 砂质粉土层平均波速只有 120 m/s 左右, 主要分布于苏州河流域和市区西南部。

(3) 3-2 砂质粉土层主要分布于市区北部沿长江区域, 平均波速达 150 m/s。

(4) 4-3 淤泥质粉质粘土层由两个亚层组成: 上亚层平均波速为 127 m/s, 遍布市区全域; 下亚层平均波速略高于上亚层, 达 140 m/s, 主要分布于浦西的西南部。

(5) 5 淤泥质粘土层由 2 个亚层组成: 上亚层平均波速为 140 m/s, 遍布市区全域; 下亚层平均波速约 164 m/s, 主要分布于浦西的北部。

(6) 6-1 粘土层主要由 3 个亚层组成: 上亚层平均波速为 173 m/s, 主要分布于浦西; 中亚层平均波速 197 m/s, 遍布市区全域; 下亚层平均波速达 226 m/s, 主要分布于浦西。

(7) 7-2 粉砂层在 -15 m 范围内仅有 2 个亚层: 上亚层平均波速约 160 m/s, 主要分布于黄浦江流域; 次亚层平均波速达 214 m/s, 遍及市区全域。

表 2 吴淞—莘庄剖面 -15 m 范围内土层剪切波分层统计

波速单位: m/s,

土层序号	土层名称	震点 ₁	震点 ₂ *	震点 ₃	震点 ₅	震点 ₆	震点 ₄	震点 ₇	震点 ₈	震点 ₉	震点 ₁₀
1	填土	101	101	102	106	105	105	105	95	98	90
2-1	粘土	104	102								
2-2	粉质粘土				123				109	108	112
2-3	砂质粉土		116								128
3-2	砂质粉土				140	147		163			
3-3	淤泥质粉质粘土	125	130	129			126	125	118	120	
		140	145				136				
4	淤泥质粘土			141		131	146	142	129	134	136
					163	164					
5-1	粘土								152	165	
			166	171	181						176
			190	191	203	206	194				
5-2	粉砂(砂质粉土)		234	223	220						
		169						161			
		218					222	201			

* 169 -15 m 层波速

3 区域工程场地的地震稳定性评价

区域工程场地的地震稳定性评价,通常着眼于地表以下 15 m 范围内的土层。其评价指标主要为场地土类型及场地类别、场地液化势和场地地脉动卓越周期。

3.1 场地土类型及场地类别确定

国家对该评价指标制订了《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89),具体可见表 3。根据表 2 中 -15 m 范围土层剪切波波速资料统计,土层平均剪切波波速仅为 129 m/s,对照表 3,可以认为上海市区区域工程场地土类型属软弱场地土。土层结构表明,上覆土层(填土、粘土、砂质粉土)的剪切波波速不高,变化于 103~150 m/s 之间,厚度仅为 4~11 m;下卧的软弱土层多属高压缩性、高灵敏度、低强度、低渗透性淤泥质土,剪切波波速仅为 127~140 m/s,厚度达 7~19 m 不等。反映土层土颗粒特性的物理力学参数也表明,上海市区 -15 m 范围内的土层总体为软弱地基土。

由于上海地区第四系较为发育,区域工程场地覆盖层厚度远大于 80 m。根据上海市区区域场地土类型和场地覆盖层厚度,对照表 3,可以确定地表以下 15 m 内土层为 IV 类建筑场地。

3.2 场地地脉动卓越周期

场地土横波速度是工程场地土在动荷载条件下对地震波传播特性的真实响应。为准确估计和防止产生共振作用,必须使工程设施的自振周期避开场地的卓越周期,可利用经验公式来计算场地土的卓越周期。经验公式为

$$T_g = \sum_{i=1}^n \frac{4H_i}{v_{si}}, \quad (4)$$

式中, T_g 为地脉动卓越周期, H_i 为第 i 层土厚度, v_{si} 为第 i 层土平均横波速度。

计算结果表明,全新统覆盖较厚的上海市区南部场地地脉动卓越周期相对较低,约为 0.65 s,市区北部区域可达 0.8 s,其它区域通常约 0.7 s。

3.3 场地液化势判别

众所周知,当近地表 20 m 范围内的粉性土和砂性土处于饱和状态且遭受外力作用或振动时,由于交变周期应力作用的结果,土体中的孔隙水压力急剧增加,导致砂土抗剪强度骤然下降,失去其原有的承载能力,致使土体失稳,很容易发生土层内部结构破坏,造成场地液化。因此,在地震条件下,可依据土层动剪应变变量值是否超过液化临界值来判别饱和粉性土和砂性土的液化程度。动剪应变变量值计算公式为

$$r_e = 0.65 \frac{a_{\max} h r_d}{v_s^2 (G/G_{\max}) r_e} \quad (5)$$

式中, $a_{\max}$ 为地面最大加速度, h 为地基土深度, r_d 为某一深度的应变折成系数, $G/G_{\max}$ 为应变为 r_e 时的模量折成系数计算公式为

$$\text{砂土: } v_{scr} = K_c \sqrt{d_s - 0.0133 d_s^2} \quad (6)$$

$$\text{粉土: } v_{scr} = K_c \sqrt{d_s - 0.01 d_s^2} \quad (7)$$

式中, v_{scr} 为饱和砂土或饱和粉土液化剪切波速临界值; K_c 饱和砂土取 92, 饱和粉土取 42; d_s 为砂层或粉土层剪切波速测点深度。

据计算成果分析,在 VII 级地震烈度条件下,不易发生土层液化的动剪切模量 G_d 一般小于 0.50×10^2 MPa, 动剪应变变量 $\gamma_e < 2.00 \times 10^{-2} \%$, 剪切波波速大于液化剪切波速临界值; 易发生土层液化的动剪切模量 G_d 则大于 0.50×10^2 MPa, 动剪应变变量 γ_e 均大于 $2.50 \times 10^{-2} \%$, 剪切波波速小于液化剪切波速临界值。上海市区的北部河口带、黄浦江和苏州河局部河段的两侧,以及西部局部地区,埋深小于 15 m 的部位的砂性土具有时代新、埋藏浅、地下水位高、饱和松散等特性,在地震烈度 VII 度时,可能发生震动液化。

前人的研究成果表明,1 500 a 以来发生的地震记录显示,不管是上海本地的地震,还是邻近地域地震的波及,对上海造成的地震影响都没有超过 7 度。总体上来看,上海地区地震具有震级小,强度弱频率低的特点,较少发生 5 级以上地震(历史地震中 6 度以上仅有 4 次)。区内与地震发生有关的活动性断

表 3 场地土类型与建筑场地类别划分

场地土类型	土层剪切波速/(m·s ⁻¹)	场地覆盖层厚度 d_{ov} /m				
		0	$0 < d_{ov} \leq 3$	$3 < d_{ov} \leq 9$	$9 < d_{ov} \leq 80$	$d_{ov} > 80$
坚硬场地土	$v_{sm} > 500$	I				
中硬场地土	$500 \geq v_{sm} > 250$		I		II	
中软场地土	$250 \geq v_{sm} > 140$		I	II		III
软弱场地土	$v_{sm} \leq 140$		I	II	III	IV

裂不发育,有昆山—嘉定断裂、张堰—南汇断裂、太仓—奉贤断裂、大场—周浦断裂等,因而地震活动基本上沿活动断裂成带分布。作为2级以上地震集中分布带(浙江萧山—上海金山带)仅通过上海市区东南部,下扬子地震带大致沿长江断裂破碎带分布,地震烈度多有5度左右。因此,从总体上来看,地震对上海市区的区域工程场地影响不会很大。井中波速测试成果表明,上海市区淤泥质粘土层以下各土层剪切波速变化于152~429 m/s之间,大于震陷影响平均剪切波速临界值,且淤泥质粘土层4~37 m以下土层地质年代已属晚更新世。因此,根据《岩土工程勘察规定》(GB50021-94)有关规定,可以认为Ⅶ级地震情况下,工程场地不会发生震陷灾害。

4 结论

土层的剪切波速度 v_s 往往反映了地层的某种物理力学性质。早在上世纪50年代,美国科学家大量采用地震波速来研究场地的类别、场地土抗震性,包括场地液化判别和震陷的预测;日本和我国科学家对横波速度与地基土刚度、承载力等做了许多研究,并应用于工程实践。

1. 上海市区基岩以上疏松层全部划归第四系,厚达300 m以上,由未固结的砂土组成,海相和陆相成因。由于与地震发生有关的活动性断裂不发育,地震对上海市区的区域工程场地影响不会很大。即使在地震设防烈度Ⅶ度情况下,仅在北部河口带、黄

浦江和苏州河局部河段的两侧,以及西部局部地区可能发生震动液化。但市区工程场地不会发生震陷灾害。

2. 利用经验公式计算地表以下30 m范围内脉动卓越周期,上海市区大致变化于0.65~0.8 s,必须使工程设施的自振周期避开这一范围值,以避免因其振作用导致软弱场地的柔性建筑、坚硬场地的似刚性建筑的严重破坏。

3. 总体上来看,上海市区地表以下15 m范围内土层软弱地基土。宏观震害资料表明,震害指数与表征土层动力特性的平均剪切模量有着较好的相关性,即场地土的平均剪切模量愈高,震害愈轻,反之则重。据市区的土层动剪切模量统计资料分析,地表以下10 m以内,剪切模量为 $(0.18 \sim 0.48) \times 10^2$ MPa;10~20 m范围内,为 $(0.28 \sim 0.88) \times 10^2$ MPa;20~50 m范围内,为 $(0.56 \sim 1.77) \times 10^2$ MPa;50~100 m范围内,为 $(1.28 \sim 3.31) \times 10^2$ MPa。可见,由地表向下,剪切模量逐渐增大,震害趋轻。

参考文献:

- [1] 陆景冈. 土壤地质学[M]. 北京:地质出版社,1997,34-96.
- [2] 丁伯阳. 土层波速与地表脉动[M]. 兰州:兰州大学出版社,1996.
- [3] 尹国康. 地貌发育的趋向与变异[J]. 地理学报,1986,41(3).
- [4] (GB50021-94)《岩土工程勘察规定》[S].
- [5] 孙秀容,戴纯俊,刘志高,等. 长江三角洲南翼晚更新世—全新世[J]. 物探与化探,2002,26(3).

A STUDY OF SHEAR WAVE FOR SEISMIC STABILITY EVALUATION OF REGIONAL ENGINEERING SITES IN URBAN DISTRICT OF SHANGHAI

SUN Xiu-rong, LIU Zhi-gao, XU Dong-er, DAI Chun-jun

(Shanghai Shenfeng Research Institute of Geological New-technique Application, Shanghai 200030, China)

Abstract: Using the technology for measuring single hole wave speed, the author made geological survey and stability evaluation of regional engineering sites in the urban district of Shanghai. The evaluation parameters mainly include soil type of the site, category of the site, liquefying power of the site, and remarkable cycle of site pulsation. The regional engineering site within the city limits permitted by -15m belongs to the wear site, being of Grade IV building site. The remarkable cycle of site pulsation is about 0.65 s in the south of the city proper, about 0.8 s in the north of the city proper, and 0.7 s in other areas. The southwestern urban area and the Suzhou River valley are liable to suffer from liquefying if Grade VII earthquake should occur.

Key words: regional engineering site; stability evaluation; technology for measuring single hole wave speed; shear wave

作者简介: 孙秀容,女,1987年毕业于中国地质大学,现任上海申丰地质新技术应用研究所所长,工程师,长期从事工程物探与工程检测,已发表论文20余篇。