



港珠澳大桥隧道工程地震液化判别

胡长友, 刘方, 李刚

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 港珠澳大桥隧道工程地震液化判别是为港珠澳大桥的抗震设计提供依据, 是为大桥建设服务的。根据英国标准 (BS规范), 通过初判和详判, 详判采用了SPT、CPTU、波速测试判别方法, 分别对港珠澳大桥隧道工程砂土进行了液化判别。通过对不同方法得出的液化判别结果进行综合分析, 确定砂土液化判别的最终结果, 并提出处理措施。通过对液化判别的最终结果分析, 并与国标液化判别结果对比分析, 分析差异, 总结规律, 为珠江三角洲入海处砂土液化判别提供经验总结。

关键词: 砂土的液化判别; 地震液化初判; SPT判别法; CPTU判别法; 波速测试判别法

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0057-05

Seismic liquefaction of HZM bridge tunnel engineering

HU Chang-you, LIU Fang, LI Gang

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The evaluation of liquefaction resistance for HZM bridge tunnel engineering is to provide the basic data for the bridge design. The criteria for evaluation of liquefaction resistance which accord with British Standard include preliminary criteria and detailed criteria. Criteria based on SPT, CPTU, wave velocity test are all used in detailed criteria. The results of a comprehensive analysis of liquefaction by different methods, determine the final results of evaluation of liquefaction resistance of sand, and propose treatment measures. We discover the laws and differences with the GB standard of the evaluation in the area of Pearl river delta on the sea and provide experience.

Key words: evaluation of liquefaction resistance of sand; preliminary criteria; SPT criteria method; CPTU criteria method; wave velocity test criteria method

港珠澳大桥岛隧工程是目前世界上在建的最长的沉管隧道, 工程场地发育饱和砂土, 存在液化的可能, 需进行液化判别, 并采取相应的处理措施, 以确保沉管隧道的抗震安全性。岛隧工程饱和砂土的液化判别是依据钻探、SPT、CPTU、波速测试等成果资料进行的。港珠澳大桥岛隧工程砂土的液化判别主要依据国际地震工程研究中心出版的文献[1]进行, 并结合了GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》^[2]及JTGT B02-01—2008《公路桥梁抗震设计细则》^[3]的初判结果。根据砂土液化判别结果, 进一步提出处理措施, 并可

为珠江三角洲入海处砂土液化判别提供经验总结。

1 地震液化初判

1.1 工程地质特征

1.1.1 地层概况

根据野外勘察结果, 场区地层自上而下分别为: 全新世海相沉积层(Q_4^m)、晚更新世陆相沉积层(Q_3^{al+pl})、晚更新世海陆交互沉积层(Q_3^{mc})、晚更新世陆相沉积层(Q_3^{al+pl})、震旦纪变质岩(Z)。其中饱和粉土及砂土层有: ①₄全

收稿日期: 2013-05-06

作者简介: 胡长友(1981—), 男, 工程师, 主要从事岩土勘察及室内试验工作。

新世海相沉积中砂层(Q₄^m)、②₂早更新世陆相沉积粉土质细砂层(Q₃^{al+pl})、③₃晚更新世海陆交互沉积粉细砂层(Q₃^{mc})、③₄晚更新世海陆交互沉积中砂层(Q₃^{mc})、④₂晚更新世冲洪积相沉积粉细砂层(Q₃^{al+pl})、④₃晚更新世冲洪积相沉积含砾细砂层(Q₃^{al+pl})、④₄晚更新世冲洪积相沉积中砂层(Q₃^{al+pl})、④₅晚更新世冲洪积相沉积粗砂层(Q₃^{al+pl})。

1.1.2 抗震设计参数

根据GB 18306—2001《中国地震动参数区划图》^[4] (该区划图设防水准为50 a超越概率10%，场地条件为平坦稳定的II类场地)，隧道区地震动峰值加速度为0.10g，地震基本烈度为Ⅶ度，地震动反映谱特征周期为0.35 s；根据《建筑抗震设计规范》^[3]，设计地震分组为第一组；按照GB 500223—2008《建筑工程抗震设防分类标准》^[5]，沉管隧道作为特殊设防类建筑考虑，抗震设防烈度应提高一度按Ⅷ度来分析，并采取相应抗震措施。

1.2 地震液化初判

1) 根据文献[1]，纯砂(N₁)₆₀>30时可判为不液化土。据此可以初判：④₅层(N₁)₆₀>30，不具备发生液化的条件，可不考虑砂土液化对场地的影响；①₄、②₂、③₃、③₄、④₂、④₃、④₄层需进行进一步液化判别。

2) 根据《建筑抗震设计规范》^[2]及《公路桥梁抗震设计细则》^[3]的初判准则，抗震设防烈度Ⅶ~Ⅷ度时，晚更新世及其以前砂土可不考虑液化影响。据此可以初判仅①₄层全新世松散中砂具有液化势，应做进一步判断。

2 地震液化详判

按BS标准进行勘察，采用文献[1]的方法，对①₄、②₂、③₃、③₄、④₂、④₃、④₄层进行进一步液化判别。包括标准贯入试验(SPT)判别方法、静力触探(CPT)判别方法、波速测试(v_s)判别方法，对上述饱和砂土、粉土进行了液化判别。

隧道区抗震设防烈度为Ⅷ度，建议采用地震动峰值加速度为0.2g用于地震液化计算。

根据文献[6]，珠江三角洲历史上发生过的地

震最大震级为5级，依据强震构造类比，震级上限为6.5级。因此，本次采用地震震级M_w=6.5用于地震液化计算。

标准贯入试验(SPT)判别方法、静力触探(CPT)判别方法、波速测试(v_s)判别方法，均采用下列公式计算(当抗液化安全系数(F_s)>1.0，应判别为非液化土)：

$$F_s = (CRR_{7.5}/CSR)MSF \tag{1}$$

$$MSF = 10^{2.24/M_w - 2.56} = 1.44 \tag{2}$$

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d \tag{3}$$

其中：

$$\begin{cases} r_d = (131 - z)/131 & \text{当 } z \leq 9.15 \text{ m} \\ r_d = (44 - z)/37 & \text{当 } 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \\ r_d = (93 - z)/125 & \text{当 } 23 \text{ m} < z \leq 30 \text{ m} \\ r_d = 0.5 & \text{当 } z > 30 \text{ m} \end{cases}$$

式中：F_s为抗液化安全系数；CSR为地震引起的循环应力比；CRR_{7.5}为导致液化的循环应力比；MSF为与地震震级有关的参数；r_d为应力折减系数。

2.1 地震液化SPT判别法

2.1.1 标准贯入试验(SPT)说明

在一般原位测试孔的土层(非软土层)、残积土、全风化岩及强风化岩每1.0 m进行标准贯入试验1次。在技术孔的砂层中每1.0 m进行标准贯入试验1次。本次勘察共完成80个钻孔。

本次采用符合BS的SPT设备(表1)。利用63.5 kg重锤自由下落760 mm，记录成功连续击入6个75 mm的击数。现场击数根据BS要求进行锤击能量及上覆压力校正，利用校正后的标贯击数进行物理力学评价。

表1 标准贯入试验设备规格

试验设备	指标	规格	
落锤(穿心锤)	锤的质量	(63.5 ± 0.5) kg	
	落距	(760 ± 20) mm	
	锤垫高度	(200 ~ 250) mm	
	锤垫质量	15 ~ 20 kg	
贯入器	对开管	长度	680 mm
		内径	35 mm
	管靴	外径	50 mm
		管内衬管	带
BW型钻杆	管靴	长度	50 mm
		刃口角度	17°18'
	直径	刃口单刃厚度	1.6 mm
		质量	φ 50 mm
			8.0 kg/m

2.1.2 地震液化SPT判别法

式(1)中 $CRR_{7.5}$ 按下列公式计算:

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \alpha=0, \beta=1.0 & \text{当 } FC \leq 5\% \\ \alpha = \exp[1.76 - (190/FC^2)], \beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] & \text{当 } 5\% < FC < 35\% \\ \alpha=5.0, \beta=1.2 & \text{当 } FC \geq 35\% \end{cases}$$

式中: $CRR_{7.5}$ 为导致液化的循环应力比; σ_{v0} 为上覆总应力; σ'_{v0} 为上覆有效应力; a_{max} 为地震峰值加速度; g 为重力加速度; r_d 为应力折减系数; $(N_1)_{60cs}$ 为经修正后的土体标贯击数; FC 为细粒含量(指黏粒和粉粒含量之和); z 为土层深度。

2.1.3 地震液化SPT判别过程

地震液化SPT判别计算过程见表2。

计算特点: 1) 与国标不同, 英标中对深度超过20 m的地层也需要进行判别; 2) 在实测击数一定的情况下, 深度越小, 上覆应力越小, 黏粒含量越小的地层越容易液化。

2.1.4 地震液化SPT判别结果及分析

标准贯入试验液化判别统计结果见表3。

表2 SPT液化判别计算

土层编号	孔号	标贯底深度/m	$N_m/30$ cm/击	$\sigma_{v1}/$ kPa	$\sigma'_{v1}/$ kPa	$(N_1)_{60}$	$FC/$ %	α	β	$(N_1)_{60cs}$	a_{max}	r_d	CSR	$CRR_{7.5}$	M_w	MSF	F_s	液化判别
33	GITB12	22.00	39.0	366.2	146.2	40.3	22.8	4.03	1.10	48.3	0.2g	0.595	0.194		6.5	1.44		不液化
33	GITB15	15.00	8.0	251.2	101.2	10.4	21.2	3.81	1.09	15.2	0.2g	0.784	0.253	0.162	6.5	1.44	0.92	液化

注: 表中 N_m 为实测标贯击数, $(N_1)_{60cs}$ 为经过杆长修正、能量校正、孔径影响校正、上覆应力校正后的土体标贯击数。

表3 标准贯入试验液化判别结果

层号	标贯个数	液化判别	
		液化个数	不液化个数
② ₂	1	0	1
③ ₃	53	1	52
③ ₄	31	0	31
④ ₂	140	0	140
④ ₃	2	0	2
④ ₄	749	0	749

表4 悬挂式P-S波速试验设备

条目	设备类型	型号	生产商(国家)	数量
定位	GPS	R7	天宝(美国)	1套
	测深仪	Hydrotrac	Odom(美国)	1套
P-S波速试验设备	P波	RS-ST01C	武汉岩海公司(中国)	1套
	S波	XG-1	廊坊大地工程检测技术有限公司	1套

标准贯入试验液化判别结果显示: ③₄层、④₂层、④₃层、④₄层均为不液化土层; ②₂层仅有一个钻孔有标准贯入试验液化判别结果, 也显示为不液化土层; ③₃层除了个别位置显示具有液化势外, 总体上显示为不液化土; ①₄层没有标贯判别资料。

2.2 地震液化波速测试判别法

2.2.1 波速测试试验说明

本次勘察在隧道区E1至E33管节之间安排了6个波速测试孔。波速测试采用悬挂式P-S波速试验方法, 所采用的设备见表4。

P波探测设备包括一个震源和两个接收器。震源和第一个接收器的间距0.3 m, 两个检波器的间

距为0.2 m。试验点间隔为1 m。横波波速试验产生的水平激发波沿孔壁传播, 横波振动信号被两个间距1 m的检波器接收到, 然后转换成电信号。

2.2.2 地震液化波速测试判别法

式(1)中 $CRR_{7.5}$ 按下列公式计算:

$$CRR_{7.5} = a(v_{s1}/100)^2 + b[1/(v_{s1}^* - v_{s1}) - 1/v_{s1}^*] \quad (6)$$

$$v_{s1} = v_s(P_d/\sigma'_{v0})^{0.25} \quad (7)$$

式中: v_s 为剪切波速; v_{s1} 为上覆压力修正后的剪切波速; v_{s1}^* 为临界剪切波速。

2.2.3 地震液化波速测试判别过程

地震液化波速测试判别计算过程见表5。

计算特点: 在波速测试值一定的情况下, 深度越小, 上覆应力越小, 黏粒含量越小的地层越容易液化。

表5 波速测试液化判别计算

标记点(V _s)	深度/m	v _p /(m·s ⁻¹)	v _s /(m·s ⁻¹)	FCI/%	σ _{v1} /kPa	σ _{v1} /kPa	a _{max}	r _d	CSR	v _{s1} /(m·s ⁻¹)	v [*] _{s1} /(m·s ⁻¹)	CRR _{7.5}	M _w	MSF	K _σ	F _s	液化判别
41	18	1 800	196	32.4	333.3	153.3	0.2g	0.703	0.199	176.1	201.3	0.166	6.5	1.44	1	1.20	不液化
39.5	22	1 783	272	32.4	366.2	146.2	0.2g	0.595	0.194	247.4	201.3		6.5	1.44	1		不液化
36.5	19	1 748	136	32.4	310.8	120.8	0.2g	0.676	0.226	129.7	201.3	0.062	6.5	1.44	1	0.40	液化

2.2.4 地震液化波速测试判别结果及分析

波速测试试验液化判别统计结果见表6。

表6 波速测试液化判别结果

层号	标记点个数	液化判别	
		液化个数	不液化个数
③ ₃	5	1	4
③ ₄	3	0	3
④ ₂	32	0	32
④ ₄	143	0	143

波速测试液化判别结果显示：③₄层、④₂层、④₄层均为不液化土层；③₃层除了个别位置显示具有液化势外，总体上显示为不液化土；①₄层和②₂层没有波速判别资料。

2.3 地震液化CPTU判别法

2.3.1 CPTU试验说明

本次勘察静力触探试验内容包括383个孔压静力触探(CPTU)试验孔和23个孔压消散试验孔。本次静力触探试验采用海床式静力触探系统，由2台Seacalf设备完成。

Seacalf系统说明：1) 探头、37 mm直径的探杆以及55 mm直径的套管。2) 海底支架及配重，可提供水下总压重200 kN。3) 安装在甲板上的数据采集和分析系统。数据采集频率是2 Hz。4) 探杆和套管以2 cm/s的速率匀速贯入。5) Seacalf系统水下总质量接近20 t，可提供100 kN的贯入反力。

表7 CPTU液化判别计算

层号	孔号	深度/m	q _t /MPa	f _s /kPa	σ _{v0} /kPa	σ _{v0} '/kPa	a _{max}	r _d	CSR	n	C _Q	F	Q	I _c			I _c	K _c	q _{tn} /(q _{tn}) _{cs} /kPa	CRR _{7.5}	M _w	MSF	F _s	液化判别	
														n=1	n=0.5	n=0.7									
14	CPTU62	12.4	1.39	11.8	197.2	73.0	0.2g	0.854	0.300	0.7	1.25	0.99	14.9	2.56	2.62	2.60	2.60	3.31	17.4	57.5	0.098	6.5	1.44	0.47	液化
14	CPTU72	4.4	1.39	15.6	69.2	25.7	0.2g	0.967	0.339	0.5	1.70	1.17	26.2	2.18	2.42	2.32	2.42	2.41	23.7	57.2	0.097	6.5	1.44	0.41	液化
14	CPTU75	8.7	1.37	20.7	137.9	51.1	0.2g	0.934	0.328	0.7	1.60	1.68	19.8	2.54	2.66	2.61	2.61	3.39	22.0	74.5	0.118	6.5	1.44	0.52	不液化

计算特点：在q_t值一定的情况下，深度越小，上覆应力越小，黏粒含量越小(由土类型指数n和土性指数I_c共同反映)的地层越容易液化。

6) 探头是截面积为15 cm²的三桥探头，可以同时测量锥尖阻力、侧摩阻力以及孔隙水压力U2和探头倾斜角。

2.3.2 地震液化CPTU判别法

当抗液化安全系数F_s>1.0且n=1或I_c>2.6，应判别为非液化土，式(1)中CRR_{7.5}按下列公式计算：

当(q_{c1N})_{cs}<50

CRR_{7.5}=0.833[(q_{tn})_{cs}/1 000]+0.05 (8)

当50≤(q_{c1N})_{cs}<160

CRR_{7.5}=93[(q_{tn})_{cs}/1 000]³+0.08 (9)

(q_{tn})_{cs}=K_cq_{tn} (10)

其中

K_c=1 当I_c≤1.64 (11)

K_c=-0.403I_c⁴+5.581I_c³-21.63I_c²+33.75I_c-17.88

当I_c>1.64 (12)

I_c=[(3.47-lgQ)²+(1.22+lgF)²]^{0.5} (13)

Q=[(q_t-σ_{v0})/P_a][(P_t/σ_{v0})ⁿ] (14)

F=[f_s/(q_c-σ_{v0})]×100% (15)

q_{tn}=C_Q(q_t/P_a) (16)

C_Q=(P_t/σ_{v0})ⁿ (17)

式中：(q_{tn})_{cs}为修正后的锥尖阻力；C_Q为锥尖阻力修正参数，C_Q≤1.7；I_c为土性指数；f_s为侧阻；n为土的类型指数。

2.3.3 地震液化CPTU判别过程

地震液化CPTU判别计算过程见表7。

2.3.4 地震液化CPTU判别结果及分析

CPTU试验液化判别统计结果见表8。

静力触探液化判别结果显示：①₄层为可液化

表8 静力触探液化判别结果

层号	试验点个数	液化判别	
		液化个数	不液化个数
① ₄	100	71	29
② ₂	27	11	16
③ ₃	935	124	811
③ ₄	336	56	280
④ ₂	624	20	604
④ ₃	3	0	3
④ ₄	1 749	207	1 542

土层; ②₂层为局部可液化土层; ③₃层、③₄层绝大多数区域呈现非液化性, 在部分地段呈现液化性, 估计是砂层中夹有薄层黏性土使锥尖阻力降低造成的不良影响; ④₂层、④₃层、④₄层、④₅层均为不液化土层。

3 地震液化综合判断及处理措施

3.1 处理措施

综合上述SPT、波速测试及CPTU分析结果, 隧道区地震液化综合判断及处理措施如下:

1) ①₄层为可液化土层, 主要分布于管节E3~E12一带, 呈透镜状分布于①₁层软土层中。E5~E12管节一带由于基槽开挖, ①₄层液化土层将会被清除, E3~E4管节一带隧道底板以上含有①₄层的①₁层软土将会被清除, 隧道底板以下含有①₄层的①₁层软土将进行地基处理。通过以上措施可消除软土及液化土的不良影响。

2) ②₂层部分域为可液化土, 主要分布于管节E1、E8、E12及西人工岛防撞区南部, 呈透镜状分布。E1管节一带为沉管与西人工岛的结合部, 将采用支撑桩做为深基础, 桩基将穿过②₂层液化土进入第4层密实砂; E8和E12管节一带由于基槽开挖②₂层液化土层将会被清除; 西人工岛防撞区南部②₂层呈透镜状分布, 且将对①₁层软土层进行地基处理, 然后软土层上将抛填厚层的块石。以上各管节采取措施将可消除液化土的不良影响。

3) ③₃层SPT及波速测试判断均显示为非液化土, 虽然CPTU判断显示有局部区域为液化土, 但估计是砂层中夹有薄层黏性土使锥尖阻力降低造成的不良影响。因此③₃层总体上仍显示为非液化土。

4) ③₄层、④₂层、④₃层、④₄层、④₅层均为不液化土层。

3.2 结论

1) 珠江三角洲入海处, 全新世砂土、更新世上部地层发育的砂土显示出地震液化势, 更新世中下部地层发育砂土为不液化土。该区域内上述显示出地震液化势的地层, 可根据工程需要, 对其进行相应的处理。

2) 通过大量试验数据的液化分析, 可为珠江三角洲入海口处的液化判别提供经验总结, 可使工程的安全性更高, 更好地服务于工程建设。

3) 与英标(BS)相比, 国标判别显示仅全新世砂土具有液化势, 这种判断结果的差异, 有地域地层特点的原因, 也有判别条件及方法差异产生的原因, 实际运用时应结合工程性质进行考察。

4 结语

1) 国标中抗震设防烈度VII~VIII度时, 晚更新世及其以前砂土可不考虑液化影响, 英标中则为纯砂($N_{160} > 30$)时可判为不液化土。

2) 与国标不同, 英标中对深度超过20 m的砂层也需要进行液化判别。

3) 英标与国标对砂土的液化判别的初判条件、判别深度要求、判别方法的不同, 造成的判别结果的差异可为重要工程勘察的砂土液化判别提供参考依据, 确保工程安全。

参考文献:

- [1] Youd T, Idriss I, Andrus R, et al. Liquefaction resistance of soils: Summary report from The 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10): 817-833.
- [2] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
- [3] JTGT B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则[S].
- [4] GB 18306—2001 中国地震动参数区划图[S].
- [5] GB 500223—2008 建筑工程抗震设防分类标准[S].
- [6] 中国地震局地壳应力研究所, 广东省地震局. 港珠澳大桥工程场地设计地震动参数评价报告[R]. 北京: 中国地震局地壳应力研究所, 2009.

(本文编辑 武亚庆)