

# 某市政道路路基砂土液化与 软土震陷的判别及处理

管星宇

(上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 路基在地震时可能发生液化、震陷等震害, 当前市政道路设计的相关规范尚未对路基提出抗液化、震陷的具体要求。本文对某市政道路地基土层液化程度、震陷量进行分析, 并提出地基抗液化措施, 为其他类似工程提供参考。场地同时存在较厚的砂土及软土层, 标准贯入试验结果表明砂土液化指数为 6.9~40.8, 地基存在严重液化土层, 参照现行规范或规程分别对砂土、软土震陷量进行估计, 结果表明当路堤高度为 3 m, 按不利情况估计的震陷量约为 250~350 mm, 其中 70% 以上产生于淤泥质软土层。根据路基特性及震害修复条件, 结合既有经验, 下卧软土层震陷通常不需专门处理; 对于液化土层, 当路基达到由路堤高度、上覆非液化土层厚度、地下水位深度及液化土层累计厚度确定的抗震设计界限时, 需采取抗液化措施, 对于较厚液化土层可采用振冲碎石桩处理。

**关键词:** 市政道路; 路基; 砂土; 液化; 软土; 震陷; 振冲碎石桩

中图分类号: U447

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)01-0076-06

## Discrimination and treatment of sand liquefaction and seismic settlement of soft soil in an urban road subgrade

GUAN Xing-yu

(Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** Liquefaction and seismic subsidence of subgrade may occur during earthquake. At present, the relevant specifications of municipal road design have not yet put forward specific requirements for roadbed resistance to liquefaction and seismic subsidence. This paper analyzes the soil liquefaction degree and seismic subsidence of a municipal road foundation, and proposes the anti-liquefaction measures of the foundation to provide reference for other similar projects. There are thick sandy soil and soft soil layers on the site, the results of standard penetration test show that the liquefaction index of sandy soil layer is 6.9~40.8, which indicates that there is serious liquefaction soil layer in the foundation. The seismic subsidence of sandy soil and soft soil layers is estimated respectively according to the current code and specification. The results show that when the embankment height is 3 m, the estimated seismic subsidence is about 250~350 mm according to the unfavorable conditions, and more than 70% of it occurs in the mucky soft soil layer. According to the characteristics of the subgrade and the repair conditions of earthquake damage, combined with the existing experience, the earthquake subsidence of the underlying soft soil layer usually does not need special treatment. For the liquefied soil layer, when the subgrade reaches the seismic design limit determined by the height of the embankment, the thickness of the overlying non-liquefied soil layer, the depth of the groundwater table and the cumulative thickness of the liquefied soil layer, anti-liquefaction measures shall be taken. For thicker liquefied soil layers, vibrofloatation stone column can be used.

**Key words:** urban road; subgrade; sand; liquefaction; soft soil; earthquake subsidence; vibrofloatation stone column

## 0 引言

饱和的松散砂土因振动引起土颗粒重新排列、挤

密, 导致孔隙水压力急剧升高, 直到孔隙水压力等于总应力时, 有效应力为0, 砂土抗剪强度丧失, 称为液化现象。液化的危害主要来自震陷, 特别是不均匀震

陷。由于液化指数不能反映上部结构的荷载影响,因此有趋势直接采用震陷量来评价液化的危害程度<sup>[1]</sup>。

目前国内外主要通过标准贯入、静力触探、剪切波速试验结合经验公式判别砂土液化<sup>[2]</sup>,而对于震陷的研究尚不成熟,对震陷量的分析通常分为砂土及软土两部分,震陷量主要取决于土层的液化程度、上部结构的荷载及地震动特性<sup>[3-4]</sup>,此外,地震波类型<sup>[5]</sup>、砂土渗透系数<sup>[6]</sup>等因素也会影响地基土层震陷量。震陷量的计算方式主要可分为经验公式、简化模型<sup>[7]</sup>及有限元分析<sup>[8]</sup>等类型。

当前市政道路设计的相关规范暂无针对地基液化及震陷量的要求,本工程液化判别及液化程度主要参考《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[1]</sup>与《公路工程抗震规范》(JTG B02—2013)<sup>[9]</sup>中的相关规定,结合《软土地区岩土工程勘察规程》(JGJ 83—2011)<sup>[10]</sup>,对地基土液化判别及震陷量进行分析,并提出抗液化措施。

## 1 工程背景

本文基于海口市府越路新建工程,拟建道路为城市主干路,全长约3 km,红线宽40~50 m,所属海口市江东新区,抗震设防烈度为8度,设计基本地震加速度值为0.30 g,设计地震分组为第二组。区域地层岩性及特征见表1,123号钻孔代表的典型地质剖面见图1。

表1 土层物理力学特性

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers				
地层	岩性	承载力 特征值/kPa	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模 量/MPa
①	杂填土Q <sup>m</sup>	—	18.5*	—
②	粉质黏土Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	115	19.3	4.63
② <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	70	17.6	2.56
③	中砂Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	140	18.5*	9.00*
③ <sub>1</sub>	细砂Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	130	18.5*	7.00*
④	淤泥质粉质黏土Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	70	17.4	2.42
④ <sub>1</sub>	细砂Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	110	18.5*	7.00*
④ <sub>2</sub>	粉质黏土Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	115	19.5	4.33
⑤	粉质黏土Q <sub>4</sub> <sup>m</sup>	130	19.6	5.65
⑥	中砂Q <sub>1</sub> <sup>m</sup>	170	18.5*	16.00*
⑥ <sub>1</sub>	细砂Q <sub>1</sub> <sup>m</sup>	160	18.5*	13.00*
⑥ <sub>2</sub>	砾砂Q <sub>1</sub> <sup>m</sup>	190	18.5*	22.00*
⑦	粉质黏土Q <sub>1</sub> <sup>m</sup>	160	18.8	5.99
⑧	粉质黏土N <sub>2</sub> <sup>m</sup>	180	19.2	6.88
⑨	粉质黏土N <sub>2</sub> <sup>m</sup>	190	19.4	6.77

注: \*表示经验值。

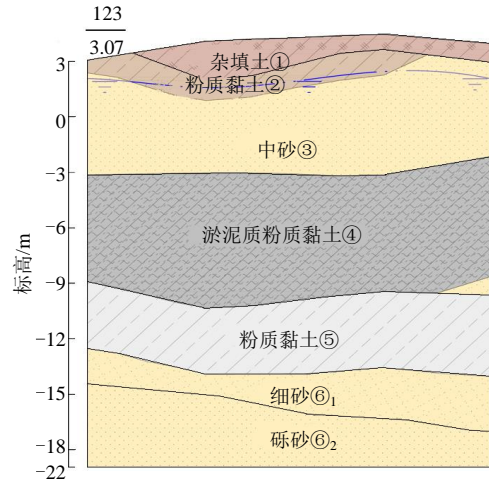


图 1 典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological profile

## 2 砂土液化判别

### 2.1 液化初判

黏性土具有黏聚力,振动时不易产生孔隙水压力,属非液化土。对于粉土,研究表明当饱和含水量符合式(1)或液性指数符合式(2)时,才属于可液化土<sup>[11]</sup>。

$$\omega_s \geq 0.9\omega_L \quad (1)$$

$$I_L \geq 0.75 \sim 1.0 \quad (2)$$

式中:  $\omega_s$  为饱和含水量;  $\omega_L$  为液限含水量;  $I_L$  为液性指数。

同时,根据规范要求,符合以下3个条件之一,可初判为不液化或不考虑液化影响。

(1)地质年代为第四纪晚更新世(Q<sub>3</sub>)及更早时期,7、8度时可判为不液化。(2)粉土的黏粒(粒径小于0.005 mm的颗粒)含量百分率,7度、8度和9度分别不小于10、13和16时,可判为不液化土。(3)浅埋天然地基的建筑,当上覆非液化土层厚度和地下水位深度符合式(3)~(5)之一时,可不考虑液化影响:

$$d_u > d_0 + d_b - 2 \quad (3)$$

$$d_w > d_0 + d_b - 3 \quad (4)$$

$$d_u + d_w > 1.5d_0 + 2d_b - 4.5 \quad (5)$$

式中:  $d_w$  为地下水位深度, m;  $d_u$  为上覆非液化土层厚度, m;  $d_b$  为基础埋置深度, m;  $d_0$  为液化土特征深度, m。

本工程拟建场地20 m范围内揭露砂土为③层中砂、③<sub>1</sub>层细砂、④<sub>1</sub>层细砂、⑥层中砂。按近期内年最高水位,③层中砂、③<sub>1</sub>层细砂、④<sub>1</sub>层细砂、

⑥层中砂属饱和砂土,根据上述判别条件,⑥层中砂为第四纪晚更新世(Q<sub>3</sub>)地层,可判为不液化土层。③层中砂、③<sub>1</sub>层细砂、④<sub>1</sub>层细砂为第四纪全新统地层,上覆非液化土层较薄,初步判定其存在液化的可能性,需进行复判。

## 2.2 液化复判

一般情况下,当饱和砂土、粉土需复判时,应采用标准贯入试验判别法判别地面下20 m范围内土的液化,当满足式(6)要求时,复判为液化土。

$$N \leq N_{cr} \quad (6)$$

$$N_{cr} = N_0 \beta [\ln(0.6d_s + 1.5) - 0.1d_w] \sqrt{3/\rho_c} \quad (7)$$

式中:  $N$  为杆长修正前的标准贯入锤击数实测值;  $N_{cr}$  为液化判别标准贯入锤击数临界值;  $N_0$  为判别锤击数基准值,由设计基本地震加速度确定,本工程取16击;  $d_s$  为饱和土标准贯入点深度, m;  $\rho_c$  为黏粒含量百分率,当小于3或为砂土时取3;  $\beta$  为与设计地震分组有关的调整系数,本工程取0.95。

对于液化土层,应通过式(8)计算液化指数并进一步判别地基液化等级,以确定地基抗液化措施要求。

$$I_{IE} = \sum_{i=1}^n \left[ 1 - \frac{N_i}{N_{cri}} \right] d_i W_i \quad (8)$$

$$W_i(z) = \begin{cases} 10, & (0 < z \leq 5) \\ \frac{2}{3}(20-z), & (5 < z \leq 20) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $I_{IE}$  为液化指数;  $n$  为每个钻孔在判别深度范围内的标准贯入试验点总数;  $N_i$ 、 $N_{cri}$  分别为  $i$  点标准贯入锤击数的实测值和临界值,当实测值大于临界值时应取临界值;  $d_i$  为  $i$  点所代表的土层厚度, m;  $W_i$  为  $i$  土层单位土层厚度的层位影响权函数值,与  $i$  土层的层中深度  $z$  有关,可按式(9)计算<sup>[12]</sup>。

通过计算,典型钻孔的标准贯入试验结果见表2,可知场地存在液化砂土层,液化等级为严重。

表2 标准贯入试验液化判别表

Table 2 Liquefaction discrimination by standard penetration test (SPT)

钻孔号	地层	$d_s$ /m	$\rho_c$ /%	$N_{cr}$ /击	$N$ /击	液化判定	$I_{IE}$	液化等级
5	③	5.5~8.5	3.0	23.56~28.47	9~14	液化	30.1	严重
	④ <sub>1</sub>	9.5~12.5	3.0	22.26~29.81	11~15	液化		
21	③	3.0~5.0	3.0	15.45~20.27	10~13	液化	12.7	中等
60	③	2.0/3.0	3.0	13.52/16.66	10/11	液化	6.9	中等
70	③	2.0~11.0	3.0	14.58~30.44	10~15	液化	37.5	严重
87	③	3.2~6.2	3.0	17.11~23.40	11~15	液化	11.7	中等
100	③ <sub>1</sub>	2.0~10.0	3.0	15.60~29.56	9~14	液化	40.8	严重
114	③ <sub>1</sub>	1.0~4.0	3.0	10.61~20.33	9~12	液化	21.3	严重
	④ <sub>1</sub>	10.0~12.0	3.0	20.03~30.44	11~14	液化		
123	③	1.5~3.5	3.0	11.21~22.04	7~9	液化	26.5	严重

注: 地下水位 $d_w$ 采用的是年最不利水位标高5.10 m; 表中“/”表示土层含两处标准贯入点; “~”表示土层标准贯入点 $\geq 3$ 点。

## 3 震陷分析

研究表明,液化场地结构物的震陷量显著大于非液化场地<sup>[13]</sup>,本文进一步对场地震陷进行分析。

### 3.1 软土震陷判别

结合唐山地震经验与天津实际震陷资料,考虑地震的偶发性和所需的设防费用,暂定软土震陷量小于50 mm时可不采取措施,因此8度区地基承载力特征值 $f_{ak} > 90$  kPa及9度区 $f_{ak} > 100$  kPa的软土均可不考虑震陷的影响。

本场地②<sub>1</sub>层淤泥质粉质黏土和④层淤泥质粉

质黏土的土层剪切波速 $v_s < 140$  m/s,属软弱土, $f_{ak} = 70$  kPa,在8级地震时应考虑震陷影响。

此外,对于塑性指数小于15的饱和粉质黏土,其震陷判别亦可参考式(1)与式(2),同时满足两式时,可判为震陷软土。

### 3.2 震陷量估计

震陷可同时发生于砂土层及软土层,震陷量计算主要由地震动加速度、土层性质与上部荷载确定,当前震陷量计算的方法仍处于探索阶段,本文以规范中的经验估算方法为依据,对本工程砂土层及软土层的震陷量进行估计。

《建筑抗震设计规范》结合既有地震经验数据、有限元法等,提出砂土与粉土液化平均震陷量的经验计算方法,对于本工程的砂土层平均震陷量估计值可按式(10)计算。

$$S_E = \frac{0.44}{B} \xi S_0 (d_1^2 - d_2^2) (0.01p)^{0.6} \left( \frac{1-D_r}{0.5} \right)^{1.5} \quad (10)$$

式中:  $S_E$  为砂土液化震陷量平均值, m;  $B$  为基础宽度, m, 本工程近似取路基放坡线宽度;  $\xi$  为修正系数, 与  $d_u$  有关, 对于本工程按式(11)计算;  $S_0$  为经验系数, 取 0.15;  $d_1$ 、 $d_2$  分别为地面算起的液化深度和上覆非液化土深度;  $p$  为基础底面地震作用效应标准组合的压力, kPa, 按式(12)计算;  $D_r$  为砂土的相对密实度, 可根据标贯锤击数  $N$  按式(13)取值。

$$\xi = \frac{6-d_u}{6} \quad (11)$$

$$p = \gamma H \quad (12)$$

$$D_r = \left( \frac{N}{0.23\sigma'_v + 16} \right)^{0.5} \quad (13)$$

式中:  $\gamma$  为路堤填土平均重度;  $H$  为路堤高度;  $\sigma'_v$  为场地竖向有效应力。

式(9)表明  $S_E$  与路堤高度  $H$  呈幂函数关系, 综合本工程竖向控制标高及抗震设计界限,  $S_E$  计算时取  $H=3$  m, 计算结果如表 3 所示。

表3 震陷量估计值  
Table 3 Estimated seismic subsidence

钻孔号	地层	$D_r$	$S_E/mm$	$S_s/mm$
5	③	0.65	29	355
	④ <sub>1</sub>	0.59	76	
21	③	0.66	12	262
60	③	0.68	8	258
70	③	0.63	65	315
87	③	0.77	15	265
100	③ <sub>1</sub>	0.70	47	297
114	③ <sub>1</sub>	0.68	9	310
	④ <sub>1</sub>	0.61	51	
123	③	0.57	30	280

对于软土震陷量, 精确计算尚不成熟且步骤较多, 参考《软土地区岩土工程勘察规程》, 当地基主要受力层深度内软土厚度  $>3$  m, 地基土等效剪切波速值  $v_{se} < 90$  m/s 时, 8 度区与 9 度区的建筑物震陷估算值分别为 150 mm、大于 350 mm, 本工程场地覆盖层厚度 20 m 范围内的  $v_{se}=155.8\sim 176.7$  m/s,

软土下卧层较深, 路基填土较低, 但软土层较厚, 且设计基本地震加速度值为 0.30 g, 综合以上因素, ②<sub>1</sub> 层淤泥质粉质黏土和④层淤泥质粉质黏土按不利情况取震陷估计值为 250 mm。

表 3 所列总震陷量  $S_s$  为砂土与软土震陷量之和, 对比可知, 液化砂土层震陷量估计值较小, 70% 以上的震陷量发生在淤泥质土层。

## 4 路基抗液化措施

### 4.1 路基抗震设计界限

目前地震动应力作用下的路基边坡稳定性验算尚缺乏经验, 《公路工程抗震规范》根据宏观震害情况、道路等级和修复难易程度提出了路基的抗震设计界限, 当满足表 4 中关于路堤高度、非液化土层厚度或地下水位深度、地面下一定深度范围内累计液化层厚度 3 个条件之一时, 可不采取抗震措施。

本工程  $d_u$ 、 $d_w$  均较小, 地面下 6 m 深度范围内液化层累计厚度较大, 需进一步研判。表 3 计算结果表明,  $H=3$  m 时按不利情况估计的总震陷量  $S_s$  约为 250~350 mm, 地震造成的破坏有限, 参照高速公路、一级公路抗震设计标准, 当  $H < 3$  m 时, 可不采取抗震措施。

表4 路基抗震设计界限  
Table 4 Seismic design limits of subgrade m

公路等级	$H$	$d_u$ 或 $d_w$	地面下6m深度内 液化层累计厚度
高速、一级公路	$<3$	$>6$	$<2$ 且 $H < 5$
二级公路	$<4$	$>5$	$<2$ 且 $H < 6$
三、四级公路	$<4$	$>4$	—

注: 表中数据适用于地震动峰值加速度 0.2 g (0.3 g)。

### 4.2 抗液化措施

在  $H \geq 3$  m 时, 路基需进行抗震设计。对于地基土震陷, 由于路基填土为散体粒料, 相对构筑物, 对不均匀震陷不敏感, 同时, 现行规范未要求处理软土震陷, 结合震陷量分析及我国公路工程震害资料, 路基实际震害仅有小规模塌方及沉陷, 可通过抢修在短时间恢复通车, 因此路基抗震设计以保证地震时主要受力层承载能力不因液化而降低为原则, 本工程仅对砂土层采取抗液化措施, 而软土层埋深较深, 不再对其进行专门的抗震陷处理。工程中对于埋深较浅的软土层, 可在一般路基设计时采用换填、加固等方式一并处理。此外, 当软土层非常厚, 可能有较大工后沉降, 或主要受力范围内砂

土层作为硬壳层的厚度较薄,则碎石桩处理范围宜包含软土层。

本工程为城市主干路,参照规范对高速公路、一级公路的地基抗液化措施要求,对于严重液化地基,宜全部消除液化沉降。

当液化土层埋深较浅,厚度 $<3\text{ m}$ 时,可采用非液化土置换全部液化土层,而本工程液化土层较厚,因此拟采用振冲碎石桩对需采取抗液化措施的路段进行处理。振冲碎石桩对于砂土有预震及挤密作用,并可成为下卧软土层的竖向排水通道,加快其排水固结,进而减少地基土液化、震陷效应。

振冲碎石桩处理至液化深度下界,直径、桩间距应根据场地土层情况、成桩设备、振冲器功率和变形要求等因素确定<sup>[14]</sup>,处理后的桩间土标准贯入锤击数应大于 $N_{cr}$ ,可通过式(14)对打桩后的标准贯入锤击值进行估算,并结合经验与计算结果对处理参数进行调整。

$$N_1 = N + 100\rho(1 - e^{-0.3N}) \quad (14)$$

式中: $N_1$ 为处理后标准贯入锤击数估计值; $\rho$ 为振冲碎石桩的理论面积置换率。

初步设计碎石桩直径为 $0.8\text{ m}$ ,桩间距 $1.6\text{ m}$ ,等边三角形布桩,图2~3分别表示5号、123号钻孔处理前后标贯击数与 $N_{cr}$ 的对比, $N_1$ 计算结果如表5所示,理论计算表明处理后的砂土可以满足地基抗液化要求,最终的处理后桩间土标准贯入锤击数应在施工过程中由现场试验复核。

此外,路堤填料应采用抗震性能较好的碎石土、黏性土等材料,当 $H > 6\text{ m}$ 时,可降低填土高度,以提高路基的抗震稳定性。

表5 处理后标准贯入锤击数估计值

Table 5 Estimated standard penetration blow count after treatment

钻孔号	地层	$N_1$ /击
5	③	30.2~37.4
	④ <sub>1</sub>	32.8~37.4
21	③	31.5~35.2
60	③	31.5/32.8
70	③	31.5~37.4
87	③	32.8~37.4
100	③ <sub>1</sub>	30.2~36.3
114	③ <sub>1</sub>	30.2~34.1
	④ <sub>1</sub>	32.8~36.3
123	③	26.9~30.2

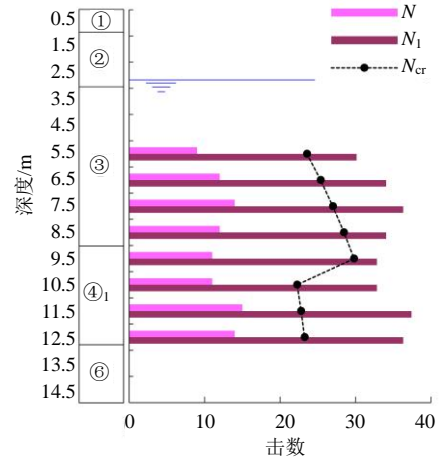


图2 钻孔5振冲前后标准贯入击数

Fig. 2 SPT blow count of borehole 5 before and after vibroflotation

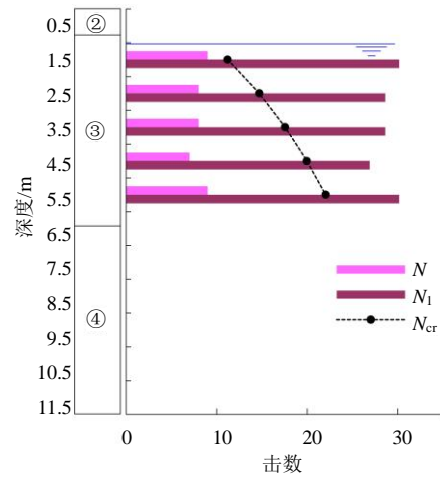


图3 钻孔123振冲前后标准贯入击数

Fig. 3 SPT blow count of borehole 123 before and after vibroflotation

## 5 结论

(1) 目前市政道路相关标准对于路基工程的场地抗液化措施尚无明确要求,严重液化地基的处理要求应参考公路、建筑、勘察规范,同时应注意各规范间差异。

(2) 通过液化初判及标准贯入试验复判,确定本工程范围内存在严重液化土层。震陷量包含砂土层与软土层两部分,通常在砂土层和软土层均较厚的情况下,砂土层震陷量小于软土层。

(3) 路基与桥梁、挡墙等构筑物不同,根据抗震设防原则,对于埋藏较深的软土层,一般不需进行专门的抗震设计;对于液化土层,也并非均需处理,当达到路基的抗震设计界限时,应综合考虑液化土层的液化程度、埋深、厚度等因素确定抗液

化措施。当液化土层埋藏浅、厚度薄,可采用换填处理;液化土层较厚时,通常采用碎石桩处理。

(4) 现行规范的液化判别与震陷分析主要基于华北地区的数据,对于海口等其他地区,后续可通过实验室试验进行更加深入的研究。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [2] 侯怀亮. 路基中砂土液化问题的设计方案选择[J]. 路基工程, 2012(6): 141-143, 146.  
HOU Huai-liang. Selection of design scheme on sandy soil liquefaction in subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2012(6): 141-143, 146.
- [3] 高广运, 谢伟, 王禹. 考虑地震动特性的饱和砂土震陷计算方法[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(2): 10-17.  
GAO Guang-yun, XIE Wei, WANG Yu. Calculation method of saturated sand compression considering seismic motion characteristics[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(2): 10-17.
- [4] 辜俊儒, 李平, 田兆阳, 等. 基于 OpenSees 的地震动对软土震陷影响研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(5): 1339-1346.  
GU Jun-ru, LI Ping, TIAN Zhao-yang, et al. Influence of ground motions on seismic subsidence of soft soil based on OpenSees[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1339-1346.
- [5] 张海丘, 高广运, 王禹. 地震波类型对砂土震陷影响的数值模拟分析[J]. 地震工程学报, 2015, 37(增刊 1): 95-100.  
ZHANG Hai-qiu, GAO Guang-yun, WANG Yu. Numerical simulations of the impact of different types of seismic waves on the seismic compression of sands[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(S1): 95-100.
- [6] 王禹, 高广运, 顾晓强, 等. 渗透系数对砂土液化震陷影响的数值研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1813-1818, 1826.  
WANG Yu, GAO Guang-yun, GU Xiao-qiang, et al. A numerical study of the influence of permeability coefficient on the liquefaction-induced settlement of sands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1813-1818, 1826.
- [7] 张为, 崔杰, 李远辉. 软土路基震陷简化计算方法[J]. 路基工程, 2009(4): 212-213.  
ZHANG Wei, CUI Jie, LI Yuan-hui. Simplified calculation method for earthquake subsidence of soft soil subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2009(4): 212-213.
- [8] 李蔓, 梁建文, 巴振宁, 等. 盾构隧道软土震陷有限元分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 240-247.  
LI Man, LIANG Jian-wen, BA Zhen-ning, et al. Finite element analysis of seismic settlement of shield tunnel in soft soil[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S1): 240-247.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程抗震规范: JTG B02—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification of Seismic Design for Highway Engineering: JTG B02—2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 软土地区岩土工程勘察规程: JGJ 83—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for Geotechnical Investigation in Soft Clay Area: JGJ 83—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [11] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
LI Guang-xin, ZHANG Bing-yin, YU Yu-zhen. Soil Mechanics[M]. Second Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [12] 华建新, 郑建国. 工程地质手册[M]. 第 5 版. 中国建筑工业出版社, 2018.  
HUA Jian-xin, ZHENG Jian-guo. Geological Engineering Handbook[M]. Fifth Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [13] 陈玉祥. 液化场地建筑物震陷影响因素研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019.  
CHEN Yu-xiang. Study on influencing factors of earthquake-induced settlement of building on liquefiable sites[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.