

李平, 田兆阳, 肖瑞杰, 张宇东, 2017. 基于三轴试验的软土震陷简化计算方法研究. 震灾防御技术, 12 (1): 145—156.
doi: 10.11899/zzyfy20170115

基于三轴试验的软土震陷 简化计算方法研究¹

李 平¹⁾ 田兆阳²⁾ 肖瑞杰¹⁾ 张宇东¹⁾

1) 防灾科技学院, 北京 101601

2) 山东省地震局, 济南 250014

摘要 本文通过对天津滨海新区典型软土的静、动力学试验, 分析了软土残余应变的变化规律, 提出了结合地区震陷经验系数的软土震陷简化计算方法, 并利用 1976 年唐山 7.8 级地震中天津塘沽地区软土震陷观测资料对计算方法进行了验证。结果表明, 本方法用于估算自由地表震陷量是可行的, 对中小工程中软土震陷量的估算具有一定的参考价值。

关键词: 软土 动三轴试验 残余应变 计算方法

引言

软土在我国沿海一带分布很广, 如长江三角洲、珠江三角洲、渤海湾以及浙江、福建沿海地区等都存在海相或湖相沉积的软土。软土具有松软、孔隙比大、天然含水量高、压缩性高、强度低、渗透性小和结构性灵敏等特点, 在受扰动或震动后极易丧失强度(吴跃东, 2008)。修建在软土上的建筑物在地震荷载作用下, 瞬间内出现突发性超量沉陷, 以及不均匀沉降, 即震陷, 从而导致建筑物显著倾斜。有时将这种沉陷称为地震引起的永久变形或残余变形。1976 年唐山大地震、1940 年埃尔森特罗地震、1960 年智利地震、1957 年和 1985 年的墨西哥大地震以及 1957 年日本宫城冲地震均出现了严重的软土震陷现象, 并造成了严重的震害(中国科学院工程力学研究所, 1979; 刘恢先, 1986)。2008 年汶川特大地震后在附近地区发现多处由软土地基引起的震害: 汉旺镇某商品房建在软土地基上, 房屋为砖柱结构, 地面发生不均匀沉降, 从而导致上部结构破坏; 都江堰市电信大楼台阶沉降, 最大沉降约 8cm。另外, 此次地震中发生多处软土震陷现象, 其中以库坝的坝体震陷较为多见(江席苗, 2009)。震害现场显示, 软土震陷是导致震害的主要原因之一, 这引起了国内外学者的广泛关注。他们采用动三轴试验、离心振动台试验等方法对软土震陷问题开展了一系列的研究, 取得了一定的成果(张建毅等, 2012; 陈国兴等, 2004; 李冬等, 2011; 陈建峰等, 2008; Narikawa

1 基金项目 中央高校基本科研业务专项资金青年项目(ZY20140206)、中央高校基本科研业务专项资金创新团队项目(ZY20160105)和国家自然科学基金项目(51508096)

[收稿日期] 2016-03-16

[作者简介] 李平, 男, 生于 1981 年。副教授。主要从事岩土工程抗震方面的研究。E-mail: chinaliping1981@126.com

等, 1999)。但现有的软土震陷量计算方法在工程应用方面还存在一定的不足之处, 我国相关规范中也未对软土震陷计算做出明确的规定。《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 和《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010) 只是在条文中说明可以参考已有的研究成果进行计算估计。最新的《软土地区工程地质勘察规范》(JGJ83—2011) 对震陷的判别和震陷量的估算做出了相应的规定, 即场区的基本烈度为Ⅶ度或大于Ⅶ度时, 对于采用天然地基的建筑物, 甲级类建筑物和对沉降有严格要求的乙级类建筑物应进行专门的震陷分析计算; 对沉降无特殊要求的乙级建筑物和对沉降敏感的丙级建筑物参照规范给出的参考值或根据地区经验确定, 但是关于震陷量计算方法也没有做出具体规定。

综上所述, 软土震陷问题早已被许多地震实例所证实。传统的结构性模型中所建立的土的结构模型一般都较为复杂, 参数较多, 并且参数需通过大量的试验获得, 对大型工程项目进行软土震陷量计算是可行的, 但是对于中小型项目来说仍存在很大的困难, 因此在实际应用中会受到一定的限制。本文在前人工作基础上, 从理论分析、动三轴试验和震害验证等方面分析软弱土动力特性, 提出一种基于动三轴试验结果的、计算准确、参数少并易测得的、工程技术人员易操作的软土震陷简化计算方法。

1 软土震陷的简化计算方法

目前, 分析土体震陷的方法主要分为 2 大类: 第一类是基于 Newmark 提出的屈服加速度概念的有限滑动位移法; 第二类是整体变形分析法, 该方法主要涉及等价节点力模型和模量软化模型。国内外很多学者大多数都基于上述 2 类研究方法开展研究 (Monismith 等, 1975; Lee, 1974; 谢君斐等, 1981; 1988; 郁寿松等, 1989; 周健等, 2000; 王建华等, 1993; 孟上九等, 2002; Seed 等, 1966), 发展及改进了相关软化模型、残余应变模型, 但很多方法都需要采用有限元方法进行计算。这些方法在工程中对较大型的项目是可行的, 但计算和试验成本较高, 使其在中小型项目中的应用存在困难。杨石红等 (1997) 提出了软弱地基土层的震陷简化计算方法, 该方法相对二维有限元计算方法简化了许多, 但计算步骤繁杂, 推导过程存在缺少试验数据支撑的缺陷, 且土的应变势是引用其他研究成果, 因此有必要在此基础上结合动三轴试验结果对该方法进行改进。本文提出基于“软化模型”概念的软土震陷简化计算方法, 简化思路是通过只计算土层在静力和地震荷载下的压缩量, 然后附加修正系数来估算土层的震陷量。本文提出的基本计算步骤简述如下:

- (1) 根据实际需要确定震陷量计算所对应的地震动水平;
- (2) 确定各层土的应力状态: 计算土的自重应力、地震剪应力;
- (3) 静三轴固结排水剪切试验确定土的邓肯参数;
- (4) 确定各层土的变形模量;
- (5) 计算土层沉降量;
- (6) 根据地震动水平选取合适的震陷量修正系数;
- (7) 确定场地的震陷量。

2 震陷量修正系数

目前, 震陷计算需要确定土层在地震作用下的残余应变值, 但其方法较为复杂。本计算方法采用带有区域经验性质的震陷量修正系数进行计算, 以避免对每个工程都要进行大

量的动三轴试验确定残余应变值,从而达到简化计算的目的,使一般工程技术人员易于掌握使用。本文的震陷量修正系数定义为:在考虑残余应变情况下,计算土层静力和地震荷载下土层的压缩量与只计算土层在静力作用下的压缩量的比值。本文的研究思路为:首先选择典型软土地带,其次进行场地勘察取样,并将原状土样进行土物理力学参数、静动三轴试验,最后根据试验数据分别计算上述 2 种情况下的压缩量,进行对比后得出震陷量修正系数。

根据以往震害调查结果,本研究将研究场地选定在天津滨海新区南海路。该场地临近 1976 年唐山 7.8 级地震中震陷较严重的塘沽望海楼及建岗村,因此既具有现实意义,又方便对计算方法所得结果作对比检验。该场地为华北平原东部滨海平原地貌,属海洋与陆相交互沉积地层,地形平坦,受人类活动影响,表层土为人工填土。本研究的钻探取样和运输均按照《岩土勘察规范》的要求进行,采用薄壁取土器以保证取土质量,并进行了钻孔波速测试等相关工作。钻孔的等效剪切波速 $V_s=143\text{m/s}$,覆盖层厚度超过 80m,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010),判定该场地土类型属软弱土,场地类别为 IV 类。共钻取了 6m、6.5m、7m、7.5m、9.5m、10.5m、11.5m、12.5m、13.5m 共 9 个深度处原状土样。

2.1 静力学试验

为了掌握土样的静力学特性,对所采原状土样进行了基本物理力学参数的测定,密度测试采用环刀法,含水率测试采用烘干法,液塑限测试采用联合测定法。从试验结果可知,所取土样的孔隙比都大于 1,并且含水率都大于液限,根据《岩土勘察规范》相关规定试验土样为软弱土,因此所取土样可以用于软土震陷动三轴试验研究。为了得到软土的邓肯参数,通过土的三轴固结排水剪切试验量测天津滨海地区软土在 3 种围压下的应力差、轴向变形和体变,以此来确定土的邓肯参数。试验结果如表 1 所示。

表 1 天津软土的邓肯参数

Table 1 Duncan parameters of soft soil in Tianjin

土类	K_0/kPa	N_s	摩擦角/ $^\circ$	粘聚力/ kPa	破坏比
淤泥质土	1237	0.465	12	20	0.478
淤泥质粉质粘土	2930	0.39	12	44	0.687

2.2 动三轴试验

动三轴试验采用美国 GCTS 公司所生产的 STX-200 型电液伺服控制双向动三轴测试系统,配备 CATS 试验控制软件。仪器最大轴向加载力为 100kN,最大围压 2MPa,加载频率 0.01—20Hz。试验用土为钻探中所取得的原状软土,现场取土后用样盒封装后运至实验室保存,试验时采用削土器将原状土削成直径为 38mm、高为 76mm 的土柱。装样后分级施加固结压力对试样进行固结,固结完成后在不排水的条件下施加轴向动荷载激振。在激振过程中,观察试样状态并利用控制软件记录振次、轴压、应变等数据。

试验主要研究的是天津软土的残余应变随振次的发展规律,共对 6.0m、6.5m、7.0m、7.5m、9.5m、11.5m、12.5m、13.5m 共 8 个不同深度的 16 组土样进行动三轴试验。采用 100kPa 的固结压力对试样进行等压固结,动荷载采用频率为 1Hz 的正弦波,测定试样在不同动应力加载下的残余应变值。为获取更多的数据,当试样动应变达到 15%或振次达到 200 周时结束试验。

2.2.1 原始激振现象

由于原状试样的土质不均匀, 虽然按规范划分均属于淤泥质土, 但在制样过程中发现土样存在一定差别, 可划分为以下 3 类, 如图 1 所示:

(1) 第一类: 试样土质较均匀, 整体均为淤泥质土。灰色、质软, 密度为 $1.7\text{—}1.8\text{g/cm}^3$ 。

(2) 第二类: 试样上下土质不均, 夹少量的粉土薄层, 密度为 $1.8\text{—}1.9\text{g/cm}^3$ 。

(3) 第三类: 试样土质不均, 有互层, 夹大量的贝屑。密度为 $1.8\text{—}1.9\text{g/cm}^3$ 。

其中, 埋深为 9.5m、13.5m 的土样属于第一类土; 埋深为 6.0m、6.5m、7.0m、7.5m、11.5m 的土样属于第二类土; 埋深为 12.5m 的土样属于第三类土。因此, 在激振过程中试样变形也表现为 3 类相似但有一定区别的情况:

(1) 第一类土在激振过程中变形较为均匀, 在动应力的作用下呈现一种整体变形的状态, 强度较低。

(2) 第二类土在激振过程中的变形主要集中在淤泥段, 粉土夹层的变形很小。

(3) 第三类土在激振过程中变形情况与第一类土类似, 也比较均匀。但因为土中夹杂着大量的贝屑, 故其强度较高, 激振结束后变形小于前两类土。

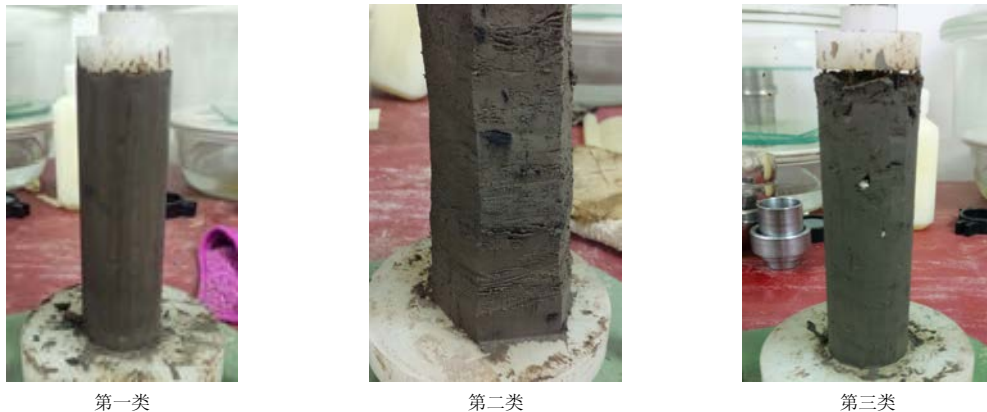


图 1 三种典型土样

Fig. 1 Three types of typical soil

2.2.2 残余应变与振次的关系

残余应变的定义是指动应力卸除后土体的残余变形, 试验中为动应力作用后试样的变形量与作用前试样高度的比值(郁寿松等, 1989)。通过动三轴试验, 测试了天津滨海软土的残余应变与振次的关系, 并利用 Monismith 等(1975)提出的指数模型来拟合试样残余应变与振次的关系为:

$$\varepsilon_p = AN^b \quad (1)$$

式中, ε_p 为残余应变, N 为循环荷载振次, A 、 b 为试验参数。

图 2 和图 3 给出了不同埋深土样在 50kPa 和 60kPa 动应力作用下残余应变随振次的变化关系、拟合结果以及 95% 的置信区间。总体上, 可以看出动应力对于残余应变增长的影响较大, 随着动应力的增大, 残余应变也有着明显的增大。不同埋深的土残余应变随着振次的变化曲线不相同, 即使是同一土类反应也不尽相同。在动应力的作用下, 除了受到动应力大小

的影响之外，试样的残余应变随振次的发展受土质的影响较大，当土质类似时，试样的残余应变大多处于同一水平。

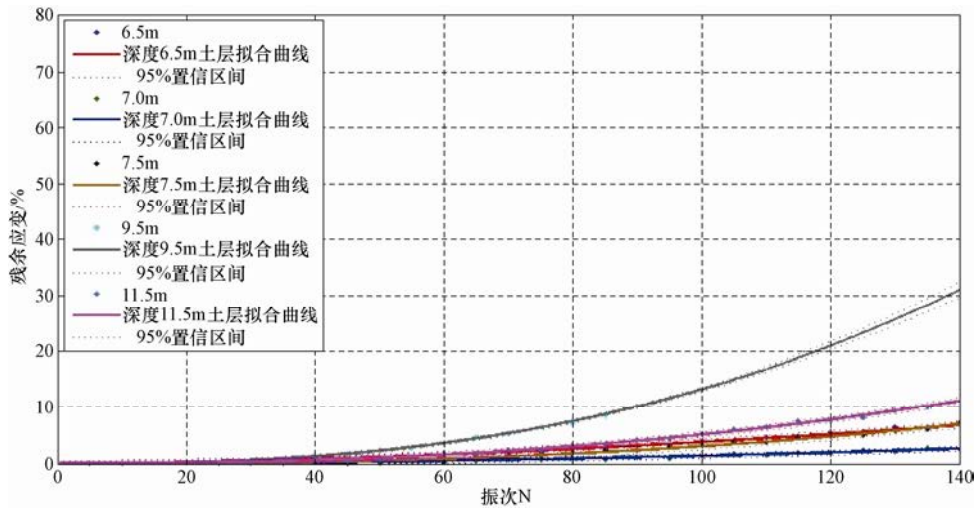


图 2 50kPa 动应力下试样残余应变与振次关系曲线

Fig. 2 Relationship of residual strain and cyclic number under 50kPa

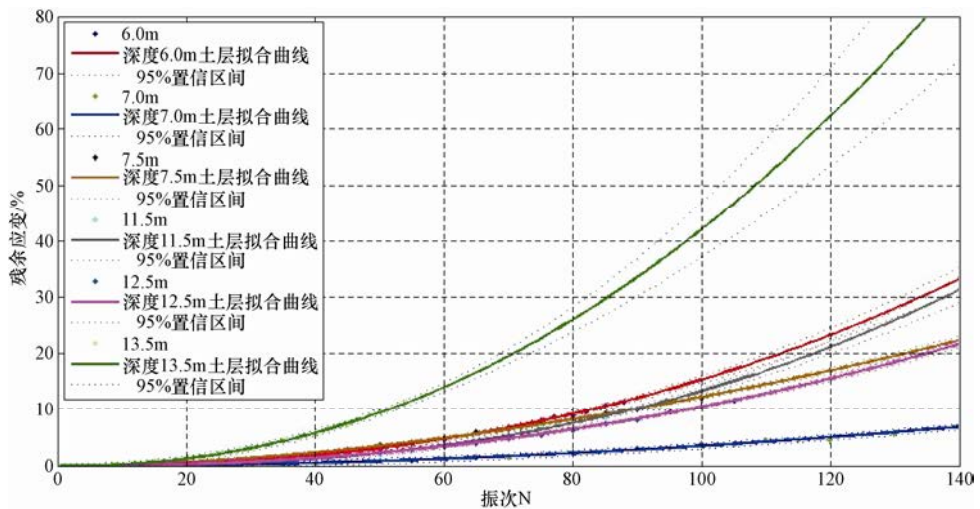


图 3 60kPa 动应力下试样残余应变与振次关系曲线

Fig. 3 Relationship of residual strain and cyclic number under 60kPa

由表 2、表 3 可以看出，绝大多数拟合结果的相关系数 R^2 都在 0.99 以上，因此指数模型可以比较好地反映出等压固结情况下试样残余应变与振次之间的关系，用这种简单的模型来进行残余应变与振次关系试验结果的整理分析是可行的。由于软土具有较强的结构性，在振次较少时，试样以弹性变形为主，在达到一定振次之后会出现残余应变的突变，该模型对于突变点的反应较不明显。随着振次的逐渐增多，残余应变的发展十分符合指数增长的规律。

表 2 50kPa 动应力下各组拟合成果

Table 2 Fitting result of residual strain under 50kPa

试样深度/m	拟合参数		相关系数
	A	b	
6.5	0.0014	1.72	0.9941
7.0	0.00018	1.95	0.987
7.5	0.000035	2.47	0.997
9.5	0.00010	2.53	0.9987
11.5	0.00010	2.31	0.995

表 3 60kPa 动应力下各组拟合成果

Table 3 Fitting result of residual strain under 60kPa

试样深度/m	拟合参数		相关系数
	A	b	
6.0	0.0040	2.28	0.9975
7.0	0.00040	1.96	0.9949
7.5	0.0040	1.77	0.9985
11.5	0.00010	2.52	0.995
12.5	0.00060	2.142	0.9988
13.5	0.0020	2.14	0.997

2.3 软土震陷的计算

2.3.1 地震动水平确定

地震荷载是一种随机荷载，具有时域和频域上的非平稳性等特征。在计算中，通常将地震荷载按照一定的规则等效为简谐振动。对于天然土层在地震作用下因土体自重引起的剪应力，采用 Seed 等（1966）提出的等效方法：

$$\tau_{\text{m}} = 0.65\gamma_{\text{d}} \frac{a_{\text{max}}}{g} \sum_{i=1}^n \gamma_i \Delta h_i \quad (2)$$

其中 $\gamma_{\text{d}} = 1 - 0.0133h_z$ ； h_z 为土层埋深； a_{max} 为地面最大加速度，对烈度 VII、VIII、IX 度区可分别取 0.125、0.25、0.4g；g 为重力加速度； γ_i 为土的天然重度； Δh_i 为各土层的厚度。则土层的动应力 σ_{d} 可为：

$$\sigma_{\text{d}} = 2\tau_{\text{m}} \quad (3)$$

根据上述方法确定勘察场地钻孔土层的竖向应力。动应力简谐振动的振动次数采用 Seed 等（1966）提出的与震级相对应的等效破坏振次来确定。历史上在天津地区引发较大震陷的地震为 1976 年 7 月 28 日发生的唐山大地震，震级为 7.8 级。根据表 4 选取 20 次和 30 次为震陷计算的等效振次。

表 4 不同震级下等效振动次数

Table 4 Equivalent vibration frequency under different magnitude

震级	6.5	7	7.5	8
振次	8	12	20	30

2.3.2 残余应变确定

根据对天津滨海地区软土的动三轴试验结果，得到其在 7.5 级和 8 级地震作用下的残余应变，如表 5 所示。

表 5 天津地区软土残余应变

Table 5 Residual strain of soft soil in Tianjin

序号	深度	层厚	土类	7.5 级地震影响下残余应变	8 级地震影响下残余应变
1	4.7	4.7	填土	-	-
2	5.5	0.8	填土	-	-
3	8.3	2.8	淤粉	0.01	0.2
4	9	0.7	粉粘	0.1	0.3
5	12	3	淤粘	0.1	0.3
6	15.8	3.8	淤粘	0.2	0.35
7	17.5	1.7	粉粘	-	-
8	20	2.5	粉粘	-	-

2.3.3 土层震前模量

鉴于淤泥质软土的变形表现为明显的非线性，故震前土层的模量采用邓肯模型来表示。根据土的三轴固结排水剪切试验及土层埋藏情况，钻孔土层的震前模量如表 6 所示。

表 6 土层震前模量

Table 6 Soil modulus before earthquake

序号	深度/m	层厚/m	土类	大主应力/kPa	小主应力/kPa	震前模量/kPa
1	4.7	4.7	杂填土	42	28	9571
2	5.5	0.8	素填土	50	34	18103
3	8.3	2.8	淤粉粘	76	50	14632
4	9	0.7	粉粘	81	54	13723
5	12	3	淤粘	103	69	14428
6	15.8	3.8	淤粘	131	88	15186
7	17.5	1.7	粉粘	147	98	16207
8	20	2.5	粉粘	169	113	14232

2.3.4 土层震后模量

震后模量的计算基于模量软化模型（郁寿松等，1989），该模型中土的刚度由 K_i 和 K_p 两部分组成：

$$K_{ip} = \frac{1}{\frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_p}} \quad (6)$$

在计算时，用土的初始模量 E_i 和拟割线模量 E_p 代替刚度 K_i 和 K_p ，得到振动后土的软化模量：

$$E_{ip} = \frac{1}{\frac{1}{E_i} + \frac{1}{E_p}} \quad (7)$$

$$E_p = \frac{\sigma_{as}}{\varepsilon_p} \quad (8)$$

式中, σ_{as} 为地震前土体的静偏应力; ε_p 为地震引起的土单元残余应变势, 可由动三轴试验获取。根据本方法计算出 7.5 级和 8 级地震影响下土层的软化模量如表 7 所示。

表 7 土层震后模量

Table 7 Soil modulus after earthquake

序号	深度/m	层厚/m	土类	震前模量/kPa	7.5 级地震影响下割线模量/kPa	8 级地震影响下割线模量/kPa	7.5 级地震影响下软化模量/kPa	8 级地震影响下软化模量/kPa
1	4.7	4.7	杂填土	9571	-	9571	9571	9571
2	5.5	0.8	素填土	18103	-	18103	18103	18103
3	8.3	2.8	淤粉粘	14632	251667	14632	13828	6765
4	9	0.7	粉粘	13723	27033	13723	9103	5439
5	12	3	淤粘	14428	34433	14428	10168	6392
6	15.8	3.8	淤粘	15186	21903	15186	8968	6861
7	17.5	1.7	粉粘	16207	-	16207	16207	16207
8	20	2.5	粉粘	14232	-	14232	14232	14232

需要说明的是, 为考虑淤泥质软土的非线性变形特性, 本文中震前土层的模量采用邓肯模型来表示, 若工程中不具备试验条件, 可用压缩模量代替。

2.4 震陷量修正系数

根据上述方法, 计算出该钻孔在 7.5 级和 8 级地震影响下地面峰值加速度为 0.4g 时自由地面的沉降量分别为 4.9cm 和 12.9cm, 具体计算结果如表 8 所示。

表 8 地震影响下自由地表震陷

Table 8 Seismic settlement of free ground under earthquake motion

序号	深度/m	层厚/m	土类	7.5 级地震影响下各层震陷量/m	7.5 级地震影响下总沉震陷量/cm	8 级地震影响下各层震陷量/m	8 级地震影响下总震陷量/m
1	4.7	4.7	填土	-	-	-	-
2	5.5	0.8	填土	-	-	-	-
3	8.3	2.8	淤粉	0.001	-	0.025	-
4	9	0.7	粉粘	0.003	4.9	0.009	12.9
5	12	3	淤粘	0.013	-	0.039	-
6	15.8	3.8	淤粘	0.032	-	0.056	-
7	17.5	1.7	粉粘	-	-	-	-
8	20	2.5	粉粘	-	-	-	-

对于不考虑模量软化的自由场地沉降值,可得到该钻孔处自由场地的沉降量 20cm,具体计算结果如表 9 所示。

表 9 不考虑模量软化的自由场地沉降量

Table 9 Free ground settlement without consideration of soften model

序号	深度/m	层厚/m	土类	竖向应力/kPa	动应力/kPa	震前模量/kPa	应变值/%	沉降值/cm
1	4.7	4.7	杂填土	42.3	20.6	9571	0.007	20
2	5.5	0.8	素填土	50.3	24.2	18103	0.004	
3	8.3	2.8	淤粉粘	75.5	34.9	14632	0.008	
4	9	0.7	粉粘	81.1	37.1	13723	0.009	
5	12	3	淤粘	103.3	45.1	14428	0.010	
6	15.8	3.8	淤粘	131.42	54.0	15186	0.012	
7	17.5	1.7	粉粘	146.72	58.5	16207	0.013	
8	20	2.5	粉粘	169.22	64.6	14232	0.016	

根据震陷量修正系数定义可得出,在 7.5 级地震作用下的震陷量大约是不考虑模量软化时的四分之一,在 8 级地震作用下的震陷量大约是不考虑模量软化时的二分之一。采用相同方法计算得到了地面峰值加速度为 0.25g 时自由场地震陷量修正系数,经估算天津滨海地区自由场地软土震陷量修正系数如表 10 所示。

表 10 天津滨海地区自由场地软土震陷量修正系数

Table 10 The settlement correction coefficient of free soft soil site in Tianjin

地面峰值加速度/g	震级/M	修正系数 C
0.25	7.5	0.2
	8	0.6
0.4	7.5	0.25
	8	0.5

需要说明的是,由于在求残余应变势时,动应力加载的振次采用 Seed 等(1966)提出的与震级相对应的等效破坏振次来确定,因此上述表格给出的是震陷修正系数与震级的关系。我国抗震设防是以烈度形式给出,因此本表要结合该地区地震安全性评价中潜在地震危险震级和设防烈度联合使用,通过潜在地震危险震级分析获得该地区可能遭受的震级,也可通过历史地震的影响确定震级,设防烈度为Ⅷ度的地区选用 0.25g,Ⅸ度区选用 0.4g,从而确定震陷修正系数。

3 震害实例对比

1976 年唐山大地震中,天津滨海地区的地基普遍产生了不同程度的震陷,其中天津新港地区望海楼住宅区和建港村住宅区的震陷现象尤为明显。这些震陷事例对于回答软土遭受振动能否构成震陷,以及确定软粘土地基形成的条件和检验估算地基震陷的方法,提供了丰富而宝贵的资料。塘沽望海楼建筑群主要建筑为 3、4 层砖混结构住宅楼,基础形式为片筏,埋

深 0.6m, 基底附加压力 44kPa, 观测沉降量 17—22cm (刘恢先, 1986)。1978 年唐山 7.8 级地震中, 天津塘沽地区烈度达到Ⅷ度, 地面加速度峰值 0.25g。

根据不考虑模量软化的简化算法, 计算出的震陷量 15.2cm。根据上文提出的经验系数, 该地区修正系数取 0.6, 则该地区自由地表震陷量约为 9.1cm。由于本计算只考虑自由场地的震陷量, 故对望海楼地区地表震陷量的估算小于唐山地震中的实际震陷量。通过对比结果分析如下:

(1) 根据震害观测资料, 塘沽新港地区的自然地面的震陷值约为 8cm, 北塘食品库震后桩头出露地表约 12cm, 与本经验系数估算结果吻合较好。

(2) 根据震害调查和观测结果可知实际地震作用下地面的震陷是不均匀的, 本方法计算所得的是一个钻孔震陷结果, 因此本估算方法只能代表在一定情况下的平均值。

(3) 本计算方法避免了在残余应变确定过程中所需进行的大量试验以及复杂的有限元计算, 只需简单计算就可以对场地的震陷量进行初步的估算, 方便快捷。

(4) 本方法存在比较多的假设条件, 所给出经验系数仅是在特定情况下的自由地面震陷估计值。今后应对不同的场地类型、建筑物结构和基础形式进行分类, 系统地给出震陷量估算的参考公式, 形成科学的震陷量估算评价体系。

4 结论及讨论

本文在前人工作的基础上, 通过对天津滨海新区典型软土的静、动力学试验, 分析了软土残余应变的变化规律, 提出了结合地区经验系数的软土震陷估算方法, 并利用 1976 年唐山 7.8 级地震中天津塘沽地区软土震陷观测资料对计算方法进行了验证。结果表明, 本方法对于自由地表震陷量的估算是可行的, 对于中小工程中软土震陷量的估算具有一定的参考价值。本文提出的震陷量修正系数省去了动三轴试验繁琐的操作, 减少了相关的工作量, 简化了软土震陷震陷量的计算方法, 易被一般工程技术人员掌握。

本文基于软土的静、动力学试验, 对现有软土计算方法中存在的难点进行了初步的研究。由于作者水平和时间的限制, 还有大量问题有待于进一步的研究。本文的震陷试验是在等压固结的条件下进行的, 对于残余应变的变化规律仅做了定性的研究, 因此有必要再通过大量试验, 确定出残余应变随动力条件变化的经验公式以及其参数与土样物理条件之间的关系; 试验中动荷载是依据 Seed 等 (1966) 提出的等效方法简化而来, 然而研究表明动荷载的加载方式对土的震陷量有较大的影响, 有必要提出一种更加适用的等效方法; 动三轴试验确定的仅仅是土单元的相关参数, 而尺度效应对于试验结果有较大的影响, 因此应进行一些模型试验, 如离心机振动台试验等, 来更好的模拟土的原位应力状态; 本文仅是用经验系数的方法对天津软土震陷计算进行了初步研究, 未能真实反映出其物理机制, 下一步研究应从其震陷机理入手, 提出更能反映真实情况的震陷计算方法; 本文给出的震陷修正系数表是基于震陷修正系数与震级的关系, 不能很好地与我国的抗震设防烈度相对应, 应用时需要确定影响震级, 使用时仍有不便, 应通过进一步研究给出与我国抗震设防烈度相对应的震陷修正系数表。

参考文献

陈国兴, 李方明, 从卫民, 2004. 多层建筑物地基震陷的简化计算方法及其影响因素分析. 防灾减灾工程学报, 24 (1): 47—52.

- 陈建峰, 俞松波, 叶铁锋等, 2008. 软土地基加筋石灰土路堤离心模型试验研究. 岩石力学与工程学报, **27**(2): 287—293.
- 刘恢先, 1986. 唐山大地震震害-第二册. 北京: 地震出版社.
- 江席苗, 2009. 汶川地震地基基础震害调查研究. 上海: 同济大学.
- 李冬, 陈培雄, 吕小飞等, 2011. 软土地震震陷研究现状综述. 工程抗震与加固改造, **33**(2): 130—135.
- 孟上九, 袁晓铭, 孙锐, 2002. 建筑物不均匀震陷机理的振动台实验研究. 岩土工程学报, **24**(6): 747—751.
- 吴跃东, 2008. 软土震陷计算方法及影响研究. 南京: 河海大学.
- 王建华, 要明伦, 1993. 饱和软粘土振动弱化特性的研究. 水利学报, **12**: 37—43.
- 谢君斐, 石兆吉, 郁寿松等, 1988. 液化危害性分析. 地震工程与工程振动, **8**(1): 61—77.
- 谢君斐, 石兆吉, 1981. 神头电厂地基震陷的初步分析. 中国科学院工程力学研究所.
- 杨石红, 刘静蓉, 刘金珠等, 1997. 软弱地基土层震陷简化计算方法研究. 世界地震工程, **13**(2): 53—61.
- 郁寿松, 石兆吉, 1989. 土壤震陷试验研究. 岩土工程学报, **11**(4): 35—44.
- 中国科学院工程力学研究所, 1979. 海城地震震害. 北京: 地震出版社.
- 张建毅, 张宇东, 徐国栋, 王强, 2012. 软土震陷判别方法分析及工程应用. 世界地震工程, **28**(3): 53—59.
- 周健, 蔡宏英, 许朝阳, 2000. 软粘土地基震陷分析. 工程抗震, (1): 40—42, 39.
- Lee K. L., 1974. Seismic Permanent Deformation in Earth Dams. School of Engineering and Applied Science, University of California, Los Angeles, California, December.
- Monismith C. L., Ogawa N., Freeme C. R., 1975. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. Transp. Res. Rec. No.537. Transportation Research Board. Washington D.C.:1—17.
- Narikawa M., Ohshima Y., Nishimura I., et al., 1999. Settlement and seismic behavior of floating foundation on thick cohesive strata. In: Seco e Pointo, ed. Earthquake Geotechnical Engineering. Rotterdam: A A Balkema.421—426.
- Seed H. B. and Clarence K. C., 1966. Clay Strength under Earthquake loading Condition, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1992, SMZ, March.

Study of Simplified Calculation Method for Seismic Settlement of Soft Soil Based on Triaxial Test

Li Ping¹⁾, Tian Zhaoyang²⁾, Xiao Ruijie¹⁾ and Zhang Yudong¹⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China

2) Shandong Earthquake Administration, Ji'nan 250014, China

Abstract Based on the static and dynamic mechanical test of soft soil in Tianjin, we analyzed change law of residual strain of soft soil. The estimation method based on static algorithm and empirical coefficient is developed to compute the seismic settlement of soft soil. By comparing the calculated results with the measured data in the 1976 Tangshan earthquake, we proved that this method is feasible. It can be used to estimate the seismic settlement of soft soil in small and middle scale engineering project.

Key words: Soft soil; Dynamic triaxial test; Residual strain; Calculation method