

施工扰动状态下软土力学指标的确定

朱剑锋, 刘干斌, 邓岳保, 林 亨, 谢琦峰

(宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于扰动状态概念理论, 提出了统一扰动函数, 并结合宁波轨道交通 1 号线和 2 号线的十字板剪切试验资料, 预测了扰动状态下的软土工程指标(如地基承载力、压缩模量等), 研究结果可为宁波软土工程勘察设计中受扰动的软土物理力学参数的取值提供指导。

关键词: 扰动状态概念; 软土; 力学参数; 施工; 扰动函数

中图分类号: TU431

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 01-0098-04

宁波市地处滨海平原, 地势低平, 市区地面高程一般为 2.0~2.5 m(黄海高程), 海相沉积软土层分布十分广泛, 厚度不均, 具有高粘粒含量、高含水量、大孔隙比等特点, 其力学性质表现为低强度、高压缩性、低渗透性、高灵敏度。软土的很多工程性质变异体现在施工扰动中, 有的软土基坑或路基工程即便将软土强度取值得很低来进行设计, 但在实际施工中仍产生了滑坡或基坑坍塌。究其原因, 是因为软土在施工扰动下, 原本很低的强度也可能损失殆尽, 形成疑似“液化”的现象。因此, 有必要开展宁波软土的工程施工扰动特性研究。

土体受到扰动后, 其结构性受到了影响, 相应的物理力学指标会因此而改变。土体受扰动的程度通常简称为扰动度, 而建立扰动度与土体物理力学参数改变量之间的函数(简称扰动函数)成为研究土体扰动理论的关键^[1]。Desai^[2]以“相对完整状态”和“完全调整状态”来描述变形材料单元, 建立了扰动状态概念(DSC)理论, 并提出了以孔隙比为扰动参量的扰动函数^[3-4]。张孟喜^[5]提出在 $p-q-e$ 坐标系中建立破坏曲面以描述扰动概念, 建立以平均应力、偏应力及孔隙比增量相对值为扰动参量的扰动度公式。徐永福^[6]将施工扰动分为应力扰动和应变扰动, 提出相应的扰动函数。王景春^[7]参考张孟喜建立扰动函数的思路, 增加了扰动参量——含水量 w 的影响, 建立相应的施工扰动度表达式。

邵允铖^[8]根据粘土三轴固结不排水试验建立了关于孔隙比的扰动函数。徐日庆和朱剑锋等^[9-11]以砂土密实度为扰动参量, 基于 DSC 理论提出了考虑扰动影响的非线性弹性模型和弹塑性模型以及土压力计算方法。

虽然国内外众多学者关于扰动函数开展了大量研究, 但有的仅考虑了不利扰动, 类似于损伤变量; 有的虽然涵盖了有利扰动, 但扰动参量不易测得, 难以在实际工程推广应用。因此, 笔者拟结合已有研究成果, 基于 DSC 理论提出统一扰动函数, 并结合宁波轨道交通的原位测试资料, 应用统一扰动函数预测扰动状态下宁波软土的工程指标。

1 统一扰动函数

1.1 扰动状态概念理论

扰动状态概念(DSC)理论首先由 Desai 提出, 并用于描述超固结土的软化特性^[2]。如图 1 所示, 在任意变形阶段, 材料单元可被看作由相对完整(RI)状态和完全调整(FA)状态所确定的混合体。由于外界扰动, 材料内部的微观结构从最初的 RI 状态经过一个自调整过程, 达到最终的 FA 状态。在此过程中, 材料有可能产生微裂隙的损伤, 也有可能由于颗粒相对运动而强度特性得到强化, 该扰动过程可通过 1 个扰动函数 D (其量值为扰动度)来描述, 通过宏观量测 D 的大小便可描述材料内部扰动状态的

收稿日期: 2014-05-07.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51409142, 51278256, 51308309); 浙江省科技厅公益项目(2012C21058); 国家住建部软科学研究项目(2013-K1-2); 浙江省教育厅科研项目(Y201327602); 宁波市自然科学基金(2012A610160); 浙江省大学生科技创新计划(2014R405040)。

第一作者: 朱剑锋(1982—), 男, 河南漯河人, 博士/讲师, 主要研究方向: 土体扰动。E-mail: zhujianfeng@nbu.edu.cn

演化, 从而对材料性状的变化过程进行模拟。

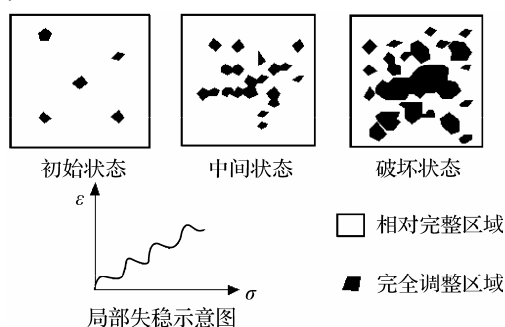


图 1 DSC 模型中的相对完整和完全调整状态^[12]

(1) 相对完整状态: 此状态的材料被认为排除了扰动因素(包括材料的摩擦、微裂纹、各向异性等)的影响, 处于一种“完整”状态(相对于受扰动状态而言), 即材料的初始状态^[12]。对于宁波软粘土, 可选施工扰动前的状态为相对完整状态。

(2) 完全调整状态: 处于此状态的材料性能已达到极限, 其结构使其特性不同于相对完整状态材料^[12]。参考 Frantziskonis “处于完全调整状态的材料不具有抗剪强度, 但能承受静水压力, 就如同一个受约束的液体”^[12], 笔者选用宁波软土强度损失殆尽, 形成疑似“液化”的状态为完全调整状态。

1.2 统一扰动函数

考虑到扰动既可致使材料产生微裂隙的损伤, 也可强化材料特性。于是, 笔者基于 DSC 理论以土体的原位参数或物理力学参数 M 为扰动参量, 统一称引起 M 减小的扰动为“负扰动”, 而引起 M 增大的扰动为“正扰动”, 建立如下的扰动函数:

(1) 负扰动 ($M \leq M_0$):

$$D = (M - M_0) / (M_0 - M_{\min}). \quad (1)$$

(2) 正扰动 ($M > M_0$):

$$D = (M - M_0) / (M_{\max} - M_0). \quad (2)$$

式中, M 为扰动后土体的物理力学参数或原位参数; M_0 为扰动前土体的物理力学参数或原位参数; $M_{\min}$ 为土体处于破坏状态时对应的物理力学参数或原位参数; $M_{\max}$ 为原位勘探时对应的物

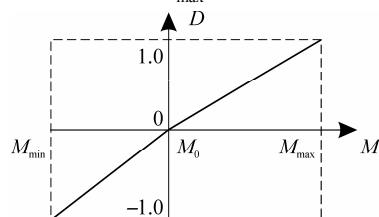


图 2 扰动度与土体参数的关系曲线

理力学参数或原位参数。

将(1)~(2)式的函数关系绘制成图 2。由图易知, 笔者所提出的扰动函数能反映土体从施工扰动前向原位状态或最破坏变化的全过程, 因此, 可称(1)~(2)式为统一扰动函数^[9-11]。

2 工程应用

由轨道交通 1、2 号线一期工程的勘察报告可知宁波地区地质条件复杂, 土层众多(共 33 个土层), 其中软土层主要分布在①~④层(表 1)。施工前各软土层的十字板剪切试强度指标(原位强度 C_{u1} 和残余强度 C'_{u1})、天然地基承载力(f)以及压缩模量(E_s)数据见表 2。现以十字剪切强度参数为扰动参量, 应用笔者所提出的统一扰动函数对扰动后宁波软土的力学指标进行预测。

表 1 宁波地区典型软土层

土层 编号	① ₃₋₀	② ₂₋₁	② ₂₋₂	② ₃₋₀	② ₄₋₀	④ ₁₋₀
土体 类别	淤泥质 粘土	淤泥 粘土	淤泥质 粘土	淤泥质粉 质粘土	淤泥质 粘土	淤泥质粉 质粘土

表 2 施工扰动前宁波软土的力学参数

土层	$C_{u1} /$ kPa	$C'_{u1} /$ kPa	$C_{u2} /$ kPa	$f /$ kPa	$E_s /$ MPa
① ₃₋₀	22.086	5.334	10.346	58	2.334
② ₂₋₁	21.847	4.381	9.782	64	1.976
② ₂₋₂	22.057	5.123	10.131	72	2.389
② ₃₋₀	26.114	7.135	11.154	93	2.734
② ₄₋₀	27.849	6.812	9.874	93	2.317
④ ₁₋₀	27.627	9.179	13.356	76	2.563

2.1 软土扰动度计算

现以十字板剪切强度为扰动参量, 根据统一扰动函数, 软土扰动度可通过(3)~(4)式进行求解:

(1) 负扰动 ($C_{uD} \leq C_{u0}$):

$$D = (C_{uD} - C_{u0}) / (C_{u0} - C_{u\min}). \quad (3)$$

(2) 正扰动 ($C_{uD} > C_{u0}$):

$$D = (C_{uD} - C_{u0}) / (C_{u\max} - C_{u0}). \quad (4)$$

式中, C_{uD} 为扰动后土体的十字板抗剪强度; C_{u0} 为扰动前土体的十字板抗剪强度; $C_{u\min}$ 为土体疑似“液化”时对应的十字板抗剪强度(一般假定为 0); $C_{u\max}$ 为原位勘探时土体对应的十字板抗剪强度。

现以地铁施工前原位勘探测得十字板剪切强

度 C_u 为初始状态(即 $C_{u\max} = C_{u0} = C_{u1}$), 假定施工过程中软土结构性完全被破坏, 则施工完成时土体的状态为负扰动状态(即 $C'_u = C_{uD}$), 根据(3)式可得地铁施工对各软土层的扰动度(表 3).

表 3 负扰动状态下各软土层的扰动度

土层	$C_{u\max}/$ kPa	$C_{u0}/$ kPa	$C_{uD}/$ kPa	$C_{u\min}/$ kPa	D
① ₃₋₀	22.086	22.086	5.334	0	-0.758
② ₂₋₁	21.847	21.847	4.381	0	-0.799
② ₂₋₂	22.057	22.057	5.123	0	-0.768
② ₃₋₀	26.114	26.114	7.135	0	-0.727
② ₄₋₀	27.849	27.849	6.812	-	-0.755
④ ₁₋₀	27.627	27.627	9.179	0	-0.668

由于软土具有触变性, 因此, 施工完成后 60 d 左右, 重新测得各软土层的十字板剪切强度(C_{u2}), 则相对于施工完成时刻, 此时软土受到正扰动, 根据(4)式可得各软土层相应的扰动度(表 4).

表 4 正扰动状态下各土层的扰动度

土层	$C_{u\max}/$ kPa	$C_{u0}/$ kPa	$C_{uD}/$ kPa	$C_{u\min}/$ kPa	D
① ₃₋₀	22.086	5.334	10.346	0	0.299
② ₂₋₁	21.847	4.381	9.782	0	0.309
② ₂₋₂	22.057	5.123	10.131	0	0.296
② ₃₋₀	26.114	7.135	11.154	0	0.212
② ₄₋₀	27.849	6.812	9.874	-	0.146
④ ₁₋₀	27.627	9.179	13.356	0	0.226

2.2 扰动状态下软土地基承载力

施工扰动后的地基承载力 f_D 如下:

(1) 负扰动($C_{uD} \leq C_{u0}$):

$$f_D = (1 + D)f_0 - Df_{\min} \quad (5)$$

(2) 正扰动($C_{uD} > C_{u0}$):

$$f_D = (1 - D)f_0 + Df_{\max} \quad (6)$$

式中, f_D 为扰动后软土层的地基承载力; f 为扰动前软土层的地基承载力; $f_{\min}$ 为土体疑似“液化”时对应的地基承载力(一般假定为 0); $f_{\max}$ 为原位勘探时软土层的地基承载力.

现结合表 2 天然地基承载力, 分别并将表 3 和表 4 的 D 值代入(5)~(6)式, 可得正、负扰动状态下各软土层相应的地基承载力 f_D (表 5 和表 6).

由表 5 和表 6 可知, 无论是软土受到了“正扰动”还是“负扰动”, 只要测得扰动前、后各软土层十字板剪切强度, 均可采用笔者提出的统一扰动度计算公式预测相应扰动状态下的软土地基承

表 5 负扰动状态下软土的地基承载力

土层	D	$f_{\max}/$ kPa	f_0/kPa	$f_{\min}/$ kPa	f_D/kPa
① ₃₋₀	-0.758	58	58	0	14.036
② ₂₋₁	-0.799	64	64	0	12.864
② ₂₋₂	-0.768	72	72	0	16.704
② ₃₋₀	-0.727	93	93	0	25.389
② ₄₋₀	-0.755	93	93	-	22.785
④ ₁₋₀	-0.668	76	76	0	25.232

表 6 正扰动状态下软土的地基承载力

土层	D	$f_{\max}/$ kPa	f_0/kPa	$f_{\min}/$ kPa	f_D/kPa
① ₃₋₀	0.299	58	14.036	0	27.181
② ₂₋₁	0.309	64	12.864	0	28.665
② ₂₋₂	0.296	72	16.704	0	33.072
② ₃₋₀	0.212	93	25.389	0	39.723
② ₄₋₀	0.146	93	22.785	0	33.036
④ ₁₋₀	0.226	76	25.232	0	36.706

载力, 避免重新进行地基承载力试验的繁琐工作.

2.3 扰动状态下软土压缩模量

施工扰动后的压缩模量 E_{sD} 如下:

(1) 负扰动($C_{uD} \leq C_{u0}$):

$$E_{sD} = (1 + D)E_{s0} - DE_{s\min} \quad (7)$$

(2) 正扰动($C_{uD} > C_{u0}$):

$$E_{sD} = (1 - D)E_{s0} + DE_{s\max} \quad (8)$$

式中, E_{sD} 为扰动后软土层的压缩模量; E_{s0} 为扰动前软土层的压缩模量; $E_{s\min}$ 为土体疑似“液化”时对应的压缩模量(一般假定为 0); $E_{s\max}$ 为原位勘探时软土层的压缩模量.

现结合表 1 压缩模量, 分别并将表 2 和表 3 的 D 值代入(7)~(8)式, 可得各土层相应的压缩模量 E_{sD} (表 7 和表 8).

综上, 只要测定施工扰动前后土体物理力学参数, 将其代入(1)式和(2)式, 则可获得任意软土层的扰动度, 无须进行地基承载力和压缩试验, 便可预测该扰动状态下的地基承载力和变形参数.

表 7 负扰动状态下软土的压缩模量

土层	D	$E_{s\max}/$ MPa	$E_{s0}/$ MPa	$E_{s\min}/$ MPa	$E_{sD}/$ MPa
① ₃₋₀	-0.758	2.334	2.334	0	0.565
② ₂₋₁	-0.799	1.976	1.976	0	0.397
② ₂₋₂	-0.768	2.389	2.389	0	0.554
② ₃₋₀	-0.727	2.734	2.734	0	0.746
② ₄₋₀	-0.755	2.317	2.317	-	0.568
④ ₁₋₀	-0.668	2.563	2.563	0	0.851

表 8 正扰动状态下软土的压缩模量

土层	D	$E_{smax}/$ MPa	$E_{s0}/$ MPa	$E_{smin}/$ MPa	$E_{sD}/$ MPa
① ₃₋₀	0.299	2.334	0.565	0	1.094
② ₂₋₁	0.309	1.976	0.397	0	0.885
② ₂₋₂	0.296	2.389	0.554	0	1.097
② ₃₋₀	0.212	2.734	0.746	0	1.167
② ₄₋₀	0.146	2.317	0.568	0	0.823
④ ₁₋₀	0.226	2.563	0.851	0	1.238

3 结语

基于扰动状态概念理论提出了统一的扰动函数表达式, 结合宁波轨道交通的十字板剪切试验资料, 预测了扰动状态下软土的力学参数。结果发现: 无论是软土受到了“正扰动”还是“负扰动”, 只要测定施工扰动前、后土体的土体的物理力学参数, 根据统一扰动函数可计算任意土层的扰动度, 进而可预测该扰动状态下软土的工程指标(如地基承载力和压缩模量等), 避免了重新进行软土物理力学参数试验的繁琐工作, 节约了勘察成本。因此, 本文所提出的统一扰动函数具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙钧, 周健, 龚晓南, 等. 受施工扰动影响土体环境稳定理论与变形控制[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10):1261-1269.
- [2] Desai C S. A consistent finite element technique for work softening behavior[C]//Proceeding of International Conference on Computer Methods in Nonlinear Mechanics, Austin, TX: University of Texas, 1974.
- [3] Park I J, Desai C S. Cyclic behaviour and liquefaction of sand using disturbed state concept [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126 (9):834-846.
- [4] Padhan S. K, Desai C. S. DSC model for soil interface including liquefaction and prediction of centrifuge test [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(2):214-222.
- [5] 张孟喜. 受施工扰动土体的工程性质研究[D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [6] 徐永福. 土体受施工扰动影响程度的量化识别[J]. 大坝观测与土工测试, 2000, 24(2):8-10.
- [7] 王景春. 考虑施工扰动的基坑性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [8] 邵允铖. 受扰动土性状室内试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [9] 徐日庆, 张俊, 朱剑锋, 等. 考虑扰动影响的修正 Duncan-Chang 模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(1):1-7.
- [10] 朱剑锋, 徐日庆, 王兴陈. 基于扰动状态概念模型的刚性挡土墙土压力理论[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(6):1081-1087.
- [11] 朱剑锋, 徐日庆, 王兴陈, 等. 考虑扰动影响砂土修正弹塑性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1):193-201.
- [12] Desai C S, Toth J. Disturbed state constitutive modelling based on stress-strain and non-destructive behaviour[J]. International Journal of Solids and Structures, 1996, 33(11):1619-1650.

Determination of Soft Clay Mechanical Index under Construction Disturbed State

ZHU Jian-feng, LIU Gan-bin, DENG Yue-bao, LIN Heng, XIE Qi-feng

(Faculty of Architectural Engineering, Civil Engineering and Environment, Ningbo University; Ningbo 315211, China)

Abstract: In this research, the unified disturbance function is developed based on the Disturbed State Concept. According to reports on the first-stage vane shear test for the line 1 and line 2 in Ningbo rail transit, the engineering indices of soft clays, such as the foundation bearing capacity and compression modulus at disturbed state, have been predicted using the unified disturbance function. The study results may serve as the scientific references for determining the physical and mechanical parameters of soft clay under the disturbed state for the geotechnical investigation and design.

Key words: disturbed state concept; soft clay; mechanical parameter; construction; disturbance function

(责任编辑 章践立)