

软土试样力学指标的扰动损伤评价

郭瑶涵,吴能森*,徐青,刘湘锴,林智雄

福建农林大学交通与土木工程学院,福建福州 350002

摘要:为研究钻探取样、运输及试样制备等环节对软土力学指标的扰动影响,开展了以下研究工作:首先,基于土的损伤评价理论,假设饱和软土粘聚力与结构强度成正比关系,提出损伤变量计算公式及其应用方法;然后以福州沿海软土为例,通过一系列固结试验及三轴试验,获得扰动土样及重塑土样的强度指标、压缩性指标,利用图解法推求得原位土的压缩性指标和结构强度,并藉此计算得到扰动土样损伤变量,进而对软土试样的扰动损伤进行量化分析和评价,主要结论如下:饱和软土的内摩擦角几乎不受扰动损伤影响,上述理论假设及依此建立的公式成立;对采用薄壁取土器取样,运输搬运环节采取了必要的保护措施,且严格按规范操作的试样,其损伤变量达20%以上,土样的压缩性增大10%,粘聚力、结构强度、地基承载力下降10%左右;土样的宏观力学指标弱化不太显著,由此产生的工程设计计算结果偏差尚可接受;倘若取样、运输搬运及试验操作环节不够严谨,则试样的损伤影响必将相应放大,值得重视。

关键词:结构性软土;复合体损伤模型;固结试验;三轴试验;损伤变量

中图分类号: TU411

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2015.05.007

0 引言

软土在我国沿海地区、内河两岸和湖泊地区广泛分布^[1],软土不仅具有天然含水量大、天然孔隙比大、压缩性高、抗剪强度及承载能力低等特点,而且具有显著的结构性^[2-4]。当前对软土结构性的研究主要针对固结应变过程和施工环节,如文献[3-6]。事实上,软土在钻探取样、运输及试样制备等环节,即便小心翼翼,也难免因扰动引起其结构性状的改变,导致试验土样(扰动土样)的力学指标不能完全真实地反映原位土的力学性状,进而影响工程计算结果。不妨把软土的这种结构性状改变称为土样损伤,土样损伤的程度及其对计算结果的影响有多大值得研究。

以采用薄壁取土器钻取的福州沿海软土为例,通过扰动、重塑土样的固结试验和固结不排水三轴试验,在获得软土扰动及重塑土样的强度指标、压缩性指标及结构强度基础上,运用土的损伤评价理论对福州软土的土样损伤进行量化分析。

1 土的损伤评价理论

根据沈珠江的复合体损伤理论^[7-8],其简化后

的双弹簧模型如式(1)^[9]:

$$S=(1-\omega)S_i+\omega S_d \quad (1)$$

式(1)中: S 为土体的力学指标; S_i 为原状土的指标; S_d 为损伤土的指标; ω 为损伤变量。

复合体损伤理论基本出发点是将结构性土体视为由原状土与损伤土组成,二者如同两个并联的弹簧共同分担荷载,式(1)中的损伤变量 ω 代表损伤土在复合体中所占比例,为此 ω 的大小可以反映土体的损伤程度。

施建勇等^[5]在研究软土扰动损伤时,依据式(1)将扰动土的力学参数表示为:

$$S_\omega=(1-\omega)S_0+\omega S_d \quad (2)$$

式(2)中: S_ω 为扰动土力学指标; S_0 为原位土力学指标; S_d 为重塑土力学指标。

根据饱和软土粘聚力与结构强度相关性的研究,软土的内摩擦角不受土体结构性变化的影响^[10],故可假设:

$$\frac{P_0}{P_\omega}=\frac{c_0}{c_\omega} \quad (3)$$

式(3)中: P_0 为原位土的结构强度(kPa); P_ω 为扰动土的结构强度(kPa); c_0 为原位土的粘聚力(kPa); c_ω 为扰动土的粘聚力(kPa)。

收稿日期:2015-03-17

基金项目:福建农林大学高水平大学建设重点项目(113-612014018);福建农林大学创新(培育)团队建设项目(Pytd12006);福建省自然科学基金项目(2007J0357)

作者简介:郭瑶涵(1989-),女,福建福州人,硕士研究生。研究方向:道路与桥涵。*通信联系人

综合式(2)、(3)可得:

$$\omega = \frac{c_0 - c_w}{c_0 - c_d} \quad (4)$$

利用扰动土样固结试验的 $e-\log P$ 曲线,可确定 P_w 和 P_0 ;通过扰动土样固结不排水三轴试验,可得到 c_w ,从而由式(3)求得 c_0 . 通过重塑土样固结不排水三轴试验,可得到重塑土样的粘聚力 c_d ,则利用公式(4)求得土样的损伤变量 ω ,进而评价钻探取样、运输及试样制备等实验环节对软土所造成的损伤影响.

2 试验研究

2.1 试验土样及制备

本试验土样取自福州市连江县可门经济区工业园 ZK8 钻孔,深度为 3.2~3.8 m 淤泥层内. 该淤泥层所取土样呈深灰色,流塑,饱和,属于滨海相

淤积成因软土,成分以粘粒为主,切面光滑,韧性低,摇晃反应慢,干强度中等. 土样的基本物理性指标为:密度 1.603 g/cm^3 ,含水率 64.8% ,孔隙比 1.786 ,塑限 30.31% ,液限 50.84% .

将由薄壁取土器经现场运回的土样视为“原状”土样,在“原状”土样上直接制取的试样称为扰动试样;取一定量的“原状”土样,风干后取足量均匀捣碎,测定风干土样含水率. 然后按照含水率一致原则计算加水量,将水与风干土样掺和搅匀制备重塑试样^[11-12].

分别制备 3 个扰动试样和 3 个重塑试样进行固结试验,试样直径 61.8 mm ,高 20 mm ;分别制备 3 组扰动土样和 3 组重塑土样进行固结不排水三轴试验,每组 3 个试样,共 18 个试样,试样直径 39.1 mm ,高 80 mm . 各试样编号见表 1.

表 1 试样编号

Table 1 Sample number

试样编号	扰动试样				重塑试样	
固结试验	01	02	03	04	05	06
	01-100	02-100	03-100	04-100	05-100	06-100
三轴试验	01-200	02-200	03-200	04-200	05-200	06-200
	01-300	02-300	03-300	04-300	05-300	06-300

2.2 试验方法

采用 GZQ-1 气压固结仪进行固结试验,加压等级分别为 50、100、200、400、800 kPa. 施加每一级压力后 24 h 测定试样高度变化,当每间隔 1 h 变形小于 0.01 mm 时,作为稳定读数,依此逐级加荷至试验结束. 其中扰动试样在加压至 200 kPa 时进行一次卸荷回弹后再压. 采用 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪进行固结不排水三轴试验,固结过程中始终开启排水阀,分别控制在围压 100、200、300 kPa 下进行固结,直至体积读数稳定或保持不变时停止;剪切过程中关闭排水阀并保持围压不变,按 0.400 %/min 剪切速率增加轴向压力,直至轴向应变值达到 16% 时结束.

2.3 试验结果

2.3.1 试验曲线 扰动土样和重塑土样的固结试验 $e-\log P$ 曲线分别如图 1、图 2 所示,扰动土样和重塑土样的固结不排水三轴试验应力应变曲线如图 3、图 4 所示,扰动土样和重塑土样的应力圆及抗剪强度线如图 5、图 6 所示.

2.3.2 土样力学指标 由上述固结试验、三轴试验可直接求得各试验土样的压缩性和抗剪强度指标. 利用扰动土样的 $e-\log P$ 曲线,可找出各扰动土

样的结构强度;根据文献[13],可在各扰动土样的 $e-\log P$ 曲线上通过图解推求得原位土的压缩曲线和结构强度(图 1). 经求平均值后,各试样及所推求原位土的力学指标见表 2,其中原位土粘聚力通过式(3)计算得到.

3 土样损伤评价

首先从表 2 得知:扰动土粘聚力 $c_w=7.0 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi_w=1.9^\circ$;重塑土粘聚力 $c_d=4.5 \text{ kPa}$ 、 $\varphi_d=2.0^\circ$. 可见,扰动土和重塑土不同的结构损伤程度主要体现在粘聚力的变化上,而内摩擦角变化很小,可忽略不计,因此上述关于饱和软土粘聚力与结构强度相关性的假设是适宜的,由此假设推导得到的公式(3)和(4)是适用的.

根据式(4)计算得到扰动土的损伤变量 $\omega=0.242$,这表明:就取样区福州连江可门经济区(大官坂片东区)而言,实验土样因取样、运输及试验操作等扰动因素引起的结构性损伤而形成的损伤土,占整个土样 24.2% .

据表 2,土样损伤对土体力学性质的影响具体表现为:压缩系数增大 10% ,压缩指数增大 10.6% ,粘聚力降低 10.3% ,结构强度降低 10.7% .

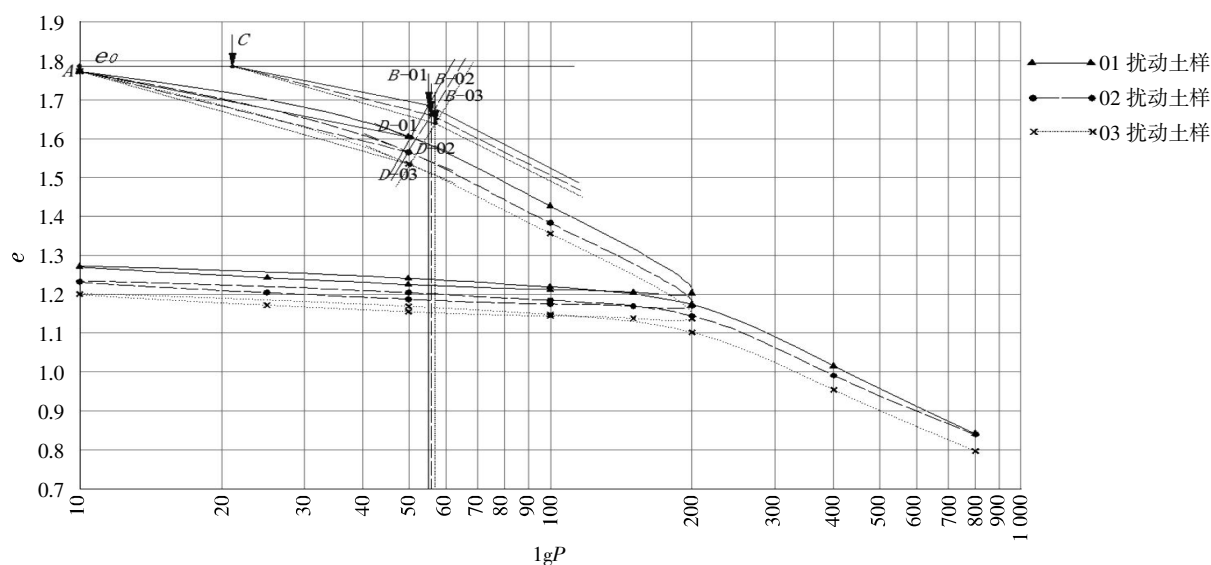


图1 扰动土样曲线及强度图解

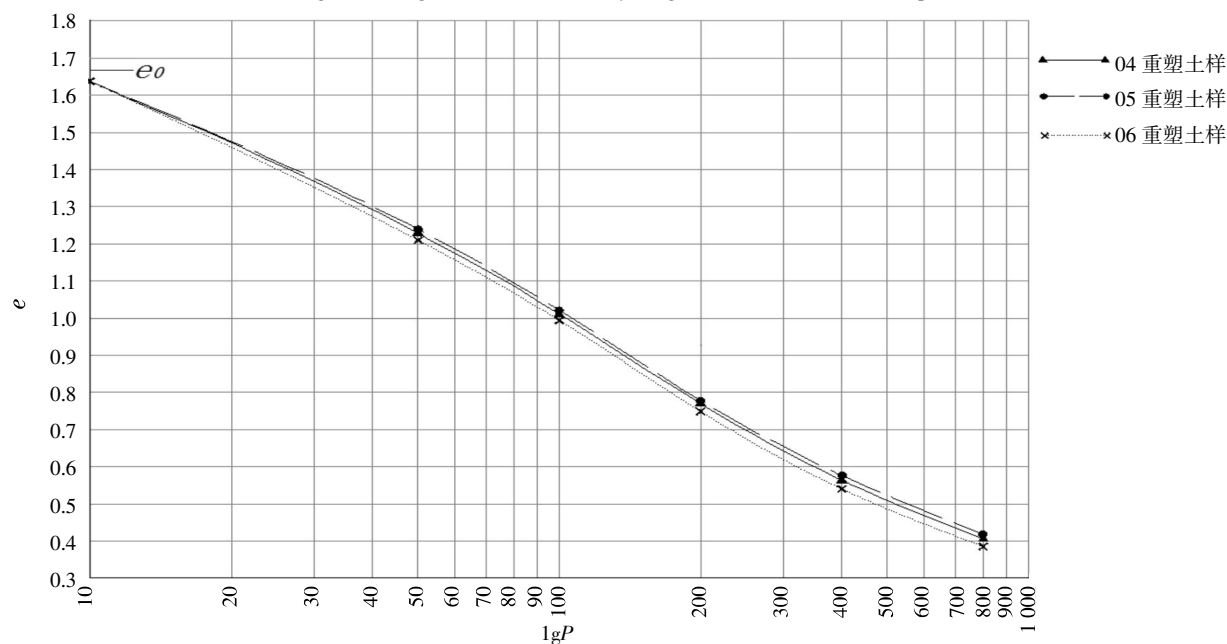
Fig. 1 e-logP curve and intensity diagram of disturbed soil sample^[13]

图2 重塑土样曲线

Fig.2 e-logP curve of remolded soil sample

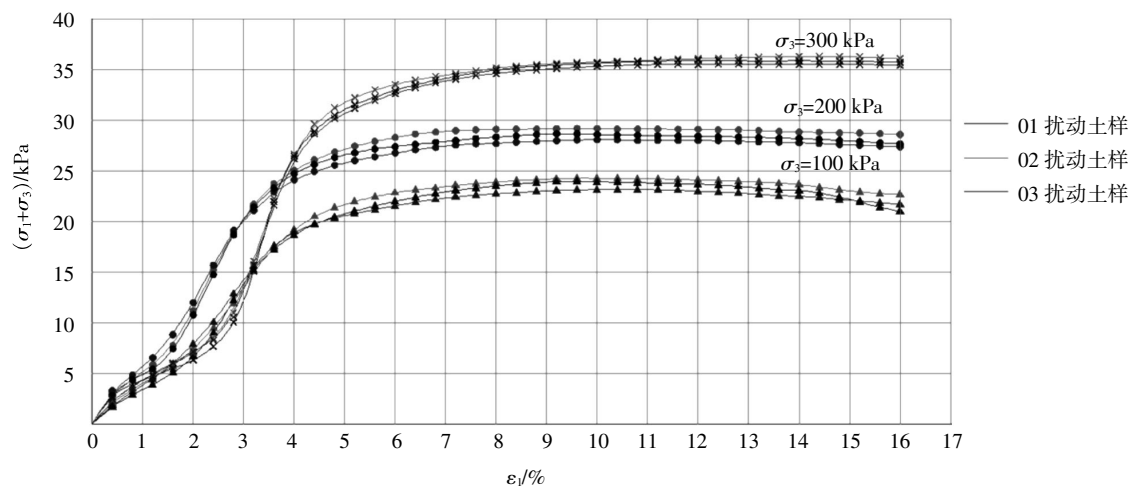


图3 扰动土样应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of disturbed soil sample

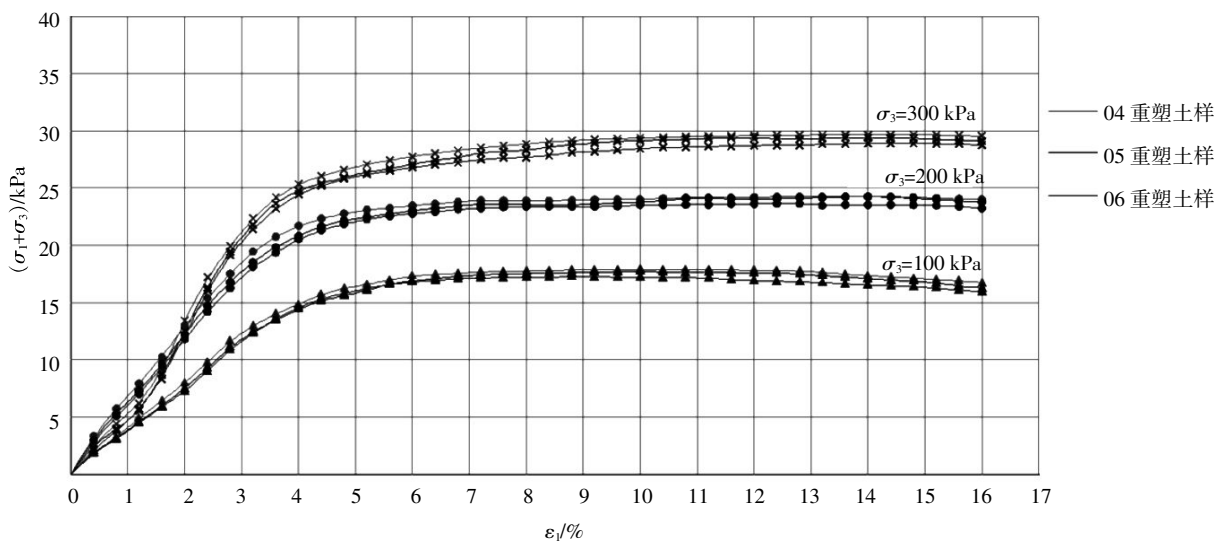


图 4 重塑土样应力-应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curve of remolded soil sample

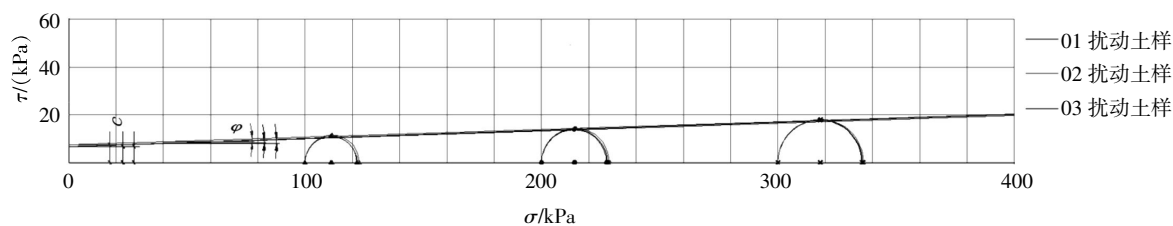


图 5 扰动土样的应力圆及强度线

Fig. 5 The circle of stress and strength line of disturbed soil sample

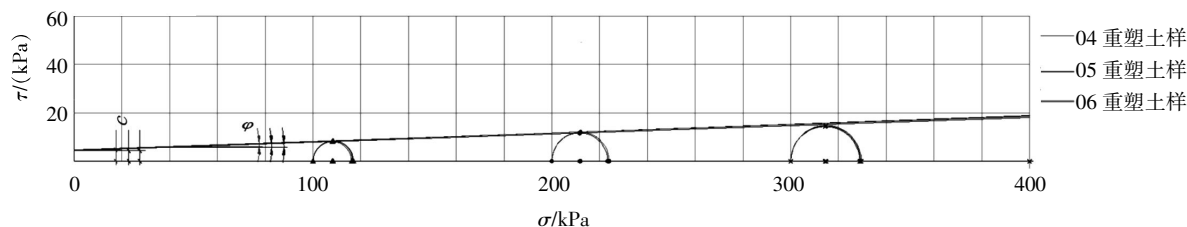


图 6 重塑土样的应力圆及强度线

Fig. 6 The circle of stress and strength line of remolded soil sample

表 2 土样力学指标

Table 2 Mechanics indexes of soil samples

土样类型	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩指数 C_c/kPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	结构强度 P/kPa
原位土	2.0	0.66	7.8	—	56.0
扰动土	2.2	0.73	7.0	1.9	50.0
重塑土	2.5	0.83	4.5	2.0	—

土样损伤对地基承载力的影响如下：地基承载力特征值 f_a 的规范^[14]计算公式为

$$f_a = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (5)$$

其中承载力系数 M_b, M_d, M_c 按内摩擦角标准值 $\varphi_k = 2^\circ$ 查表 ($M_b = 0.03, M_d = 1.12, M_c = 3.32$), 粘聚力标准值 c_k 取表 2 数值计算; 取 $b = 6 \text{ m}, d = 0 \text{ m}$, 则由式(5)得到: 原位土 $f_a = 26.9 \text{ kPa}$, 扰动土 $f_a = 24.2 \text{ kPa}$. 地基承载力特征值亦降低 10%.

4 结 语

a. 福州沿海地区软土结构性强, 因取样、运输及试验操作等扰动因素会引起土样发生结构性损伤, 使土性有所弱化. 研究表明: 根据复合体损伤理论, 上述扰动因素形成的损伤土(重塑土)在复合体中所占比例达 20% 以上(本例为 24.2%), 导致土样的压缩性增大约 10%, 粘聚力、结构强度、地

基承载力下降 10%左右。

b. 就扰动形成的损伤土(重塑土)比例而言,还是有些可观的,但因原状软土本身压缩性指标高而强度指标低,且内摩擦角几乎不受影响,因此视为复合体的扰动土的宏观力学指标弱化不太显著,由此产生的工程设计计算结果偏于安全,其偏差值(亦 10%左右)尚可接受。

c. 对结构性软土,务必采用薄壁取土器钻取试样,运输搬运环节需要采取必要的保护措施,并严格按照试验标准规范操作,否则上述的损伤变量必加大,土的宏观力学指标弱化比例及由此引起的计算结果偏差必大于 10%,乃至严重偏离实际。

致 谢

本研究得到福建农林大学、福建省自然科学基金委的资助,中土集团福州勘察设计院有限公司和福建农林大学交通与土木工程学院分别给予取样、运输及试验工作的大力支持,特此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 吴能森,朱德良.地基与基础[M].北京:中国建材工业出版社,2012:317-319.
WU Neng-sen,ZHU De-liang.Ground and foundation [M].Beijing:China Building Materials Press,2012:317-319.(in Chinese)
- [2] 徐定.福州软土地区上浅基的岩土工程问题[J].岩土力学,1993,14(3):73-80.
XU Ding.The Geotechnical problems of the shallow foundation in the soft soil area of Fuzhou[J]. Rock and Soil Mechanics,1993,14(3):73-80.(in Chinese)
- [3] 马正文,周春梅.京沪高铁软土地基物理力学参数的选取方法[J].武汉工程大学学报,2011,33(1):18-22.
MA Zheng-wen,ZHOU Chun-mei.Discussion on selection of physical and mechanical parameters for Jing-Hu high speed railway soft foundations[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2011,33(1):35-38.(in Chinese)
- [4] 孙红,赵锡宏.结构性软土的损伤及其对地基沉降的影响[J].岩土力学,1999,20(1):19-21.
SUN Hong,ZHAO Xi-hong.Damage of structured soft soil and influence on settlement[J]. Rock and Soil Mechanics,1999,20(1):19-21.(in Chinese)
- [5] 施建勇,赵维炳.砂井施工对软粘土扰动的研究[J].河海大学学报:自然科学版,1997,25(2):30-33.
SHI Jian-yong,ZHAO Wei-bing.Effect of sand drainage construction on soft clay disturbance[J]. Journal of Hohai University:Natural Science,1997,25(2):30-33.(in Chinese)
- [6] 丁绿芳,郭志平,赵维炳.真空预压加固软基时土体的损伤[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):57-60.
DING Lu-fang,GUO Zhi-ping,ZHAO Wei-bing.Damage to soft soil under vacuum preloading[J]. Journal of Hohai University:Natural Science,2002,30(4):57-60.(in Chinese)
- [7] 沈珠江.结构性粘土的弹塑性损伤模型[J].岩土工程学报,1993,15(3):21-28.
SHEN Zhu-jiang.An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1993,15(3):21-28.(in Chinese)
- [8] 沈珠江.理论土力学[M].北京:中国水利水电出版社,2000:73-74.
SHEN Zhu-jiang.Theory of soil mechanics[M]. Beijing:China Water & Power Press,2000:73-74.(in Chinese)
- [9] 沈珠江.结构性粘土的非线性损伤力学模型[J].水利水运科学研究,1993,9(3):247-255.
SHEN Zhu-jiang.A nonlinear damage model for structured Clay[J]. Hydro-Science and Engineering,1993,9(3):247-255.(in Chinese)
- [10] 吴能森,侯伟生,赵尘.土的结构损伤与损伤模型问题探讨[J].福建工程学院学报,2005,3(1):21-23.
WU Neng-sen,HOU Wei-sheng,ZHAO Chen.Probing into problems of the structure damage of soil and the damage model[J]. Journal of Fujian University of Technology,2005,3(1):21-23.(in Chinese)
- [11] 水利部南京水利科学研究所.GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,1999
Hydraulic Research Institute. GB/T 50123 -1999 Standard for soil test method [S]. Beijing:China Planning Press,1999.(in Chinese)
- [12] 吴能森,赖榕洲,邹文平,等.含水率对花岗岩残积土邓肯-张模型参数影响[J].武汉工程大学学报,2013,35(9):18-22.
WU Neng-sen,LAI Rong-zhou,ZOU Wen-ping,et al. Influence of moisture content on parameters of Duncan-Chang model for granite residual soil[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2013,35(9):18-22.(in Chinese)
- [13] 王立忠,李玲玲,丁利,等.温州煤场软土结构性试验研究[J].土木工程学报,2002,35(1):88-92,106.
WANG Li-zhong,LI Ling-ling,DING Li,et al.Experimental study on the structure property of soft clay[J]. Journal of Civil Engineering,2002,35(1):88-92,106.(in Chinese)

- [14] 中华人民共和国建设部.GB50007-2011 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Ministry of Construction of the People's Republic of China.GB50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing:China Architecture & Building Press.(in Chinese)

Disturbance damage evaluation of mechanical parameters of soft soil sample

GUO Yao-han, WU Neng-sen, XU Qing, LIU Xiang-kai, LIN Zhi-xiong

College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: To study the disturbed effect of the mechanical indexes of soft soil in the course of drilling, transport, sample preparation and other steps, firstly, based on the theory of soil damage assessment, the assumption of cohesive force proportional to the structural strength for saturated soft soil was supposed which derives the damage variable formula and its application method. Secondly, a series of consolidation tests and three triaxle tests were conducted for Fuzhou coastal disturbed and remolded soft soil samples, and their strength and compressibility index were obtained, then the compression index and the structural strength of undisturbed soil were ascertained by using graphic method, thereby the disturbed soil sample's damage variable was calculated. Based on above works, the damage effects of soft soil sample were analyzed and evaluated quantitatively, and the results show that the internal friction angle of saturated soft soil is almost not affected by the influence of disturbance damage, so the above theoretical assumption and accordingly the established formula are valid; the damage variable is more than 20% and the compression of soil samples increases about 10%; the cohesion, structural strength and the foundation bearing capacity decrease about 10%. It is necessary to take protective measures in transport process and operate strictly according to the standards in tests. the weakness macro-mechanics indexes of soft soil sample is not obvious, so the difference between calculation results can be accepted in engineering practice; if the sampling, transport and test operation link is not rigorous, the sample damage effect will be corresponding amplification, which is worthy of attention.

Keywords: structured soft clay; structure damage; the complex damage model; consolidation test; triaxial test; damage variable.

本文编辑: 龚晓宁