

软土结构性的工程效应*

吕海波^{1,2}, 汪 稔², 赵艳林¹, 孔令伟²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 通过对琼州海峡铁路轮渡防波堤爆破挤淤中出现的问题进行分析, 认为结构性的存在是两种软土施工出现不同工程效应的原因, 并在此基础上对结构性的工程效应进行了初步的探讨。

关键词: 软土, 结构性, 工程效应

中图分类号: TU 447 文献标识码: A 文章编号: 1004-3152(2003)02-0012-04

1 前言

结构性在天然软土中是普遍存在的。但长期以来, 由于各种原因没有引起重视, 直至 90 年代 Burland^[1]和沈珠江^[2]总结了国内外的研究成果以及提出新的方向, 这一问题才重新引起了关注。总的来说软土的结构性表现在具有结构强度, 在应力水平低时, 土体表现出较好的力学性质; 而一旦应力过高, 结构将会突然发生破坏, 土的力学性质急剧恶化^[3,4]。本文通过一个软土结构性产生的工程问题, 对结构性的工程效应进行初步的探讨, 抛砖引玉, 为今后工程实践中的类似问题提供参考。

2 工程概况及试验研究

2.1 工程概况

琼州海峡铁路轮渡工程的南(海口)、北(湛江)两港拟建防波堤区的软土均为灰色淤泥, 含水量高、压缩性大, 符合爆破挤淤要求, 但在对北港的防波堤进行爆破挤淤工程施工中, 却出现堤心抛石未能达到原设计标高要求的异常情况, 而南港的防波堤施工却是正常。土物理力学指标相近却出现不同的工程效应, 为弄清机理需深入研究。

2.2 试验研究

在南北两港防波堤港池内侧 90m 处钻孔取样, 取土器为上海金勘的敞口薄壁型 TB100A, 取样时采用套管护壁、快速静压的方法。所取土样的物理指标如表 1, 可见两者皆为高孔隙比的淤泥。

表 1 南北两港软土物理指标

土样	取样深度 (m)	重度 $\bar{\alpha}$ (kN·m ⁻³)	天然含水量 w (%)	比重 G_s	孔隙比 e	液限 W_L (%)	塑限 W_P (%)
北港	4.0~7.0	15.7	66.0	2.7	1.80	65.1	22.5
南港	4.2~7.5	15.3	73.3	2.7	2.01	60.3	25.5

注: 南港水深 7.0m, 北港水深 5.0m。

2.2.1 宏观力学试验

进行了压缩实验、无侧限、三轴 CU 剪。图 1~4、表 2 为试验结果。

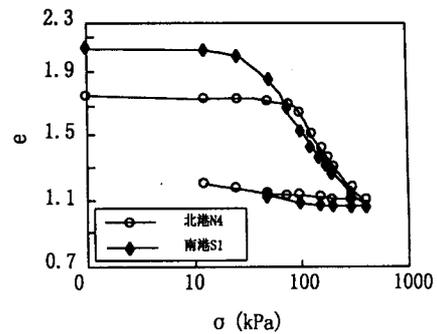


图 1 典型压缩曲线

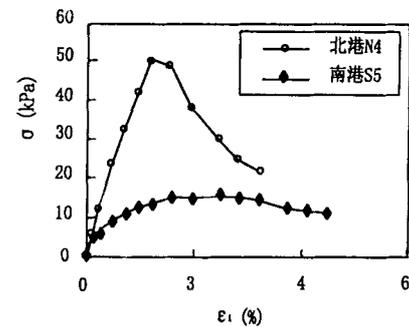


图 2 典型无侧限试验曲线

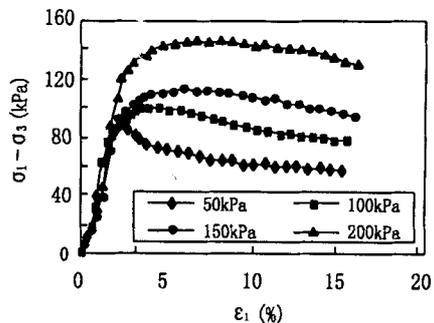


图 3 北港(N3)CU剪($\sigma_1-\sigma_3$)- $\bar{\alpha}$ 关系曲线

表 2 两港软土的力学指标

土样	a_{v1-2} (MPa ⁻¹)	σ_{vy} (kPa)	q_u (kPa)	S_t	C_{cu} (kPa)	$\bar{\alpha}_{cu}$ (°)
北港	3.33	100	53.4	13.8	30.0	8.8
南港	2.47	30	12.1	/	5.9	13.1

* 收稿日期: 2003-03-09

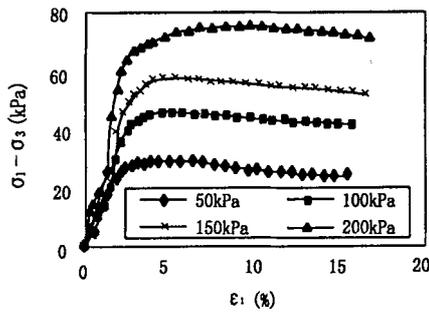


图 4 北港(S3)CU 剪(σ₁~σ₃)~ε₁关系曲线

试验结果表明北港软土的结构性强于南港软土，表现在：(1)由压缩试验确定的北港软土的结构屈服应力图 $\sigma_{vy} = 100\text{kPa}$ ，大于其上覆有效压力 $\sigma_{v0}=50\text{kPa}$ ，且在压力超过 σ_{vy} 后曲线为陡降型；而南港软土的结构屈服应力为 30kPa ，等于其上覆有效压力，压力超过 σ_{vy} 后曲线呈缓降型；(2)从无侧限强度试验结果来看，北港软土的(σ₁~σ₃)~ε₁曲线呈脆性破坏的形式，南港软土的(σ₁~σ₃)~ε₁曲线较为平缓；(3)北港软土的三轴 CU 剪试验的(σ₁~σ₃)~ε₁曲线在围压小于先期固结压力时为应变软化型，当围压大于屈服应力时，结构发生破坏，应力应变关系呈硬化型；而南港软土为应变硬化型。

由此可见，南北两港软土的结构性存在着很大的差异，北港软土结构性较强，结构强度高；南港软土结构性较弱，结构强度低，为一般的正常固结软土。这是导致两种软土在爆破挤淤施工中出现不同工程效应的主要原因。

2.2.2 微观试验

为了进一步验证，我们还从微观机理上进行了分析。

利用冷冻干燥将试样脱水后，进行了矿物组成、物理化学性质、孔隙分布、扫描电镜试验。结果见表 3，4 和图 5~7。

表 3 两港软土的矿物组成

土 样	原生矿物含量(%)		次生粘土矿物含量(%)		
	石英	长石	高岭石	伊利石	绿泥石
N1	40 ±	10 ±		25 ±	25 ±
N5	35 ±	15 ±	5 ±	35 ±	10 ±
S1	30 ±		15 ±	25 ±	30 ±
S4	25 ±	10 ±	10 ±	35 ±	20 ±

表 4 两港软土的物理化学分析结果

土 样	PH 值	易溶盐总 量(%)	有机质 (%)	游离氧化物(%)			
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	无定形 Fe ₂ O ₃
N1	8.36	1.36	1.37	1.08	0.62	0.88	0.040
N5	8.51	1.72	1.19	0.93	0.56	0.57	0.034
S1	8.70	1.13	2.60	1.95	0.56	0.64	0.044
S4	9.19	0.32	2.33	2.00	0.63	0.63	0.042

从物质组成和物理化学性质分析，由于南港(S1, S4)软土的粘土矿物和有机质含量均比北港软土多，原生矿物含量比北港软土少，使得南港软土的分散性比北港(N1, N5)软土大。南北两港软土的

胶结物质游离氧化物含量相差不大，且软土均处于弱碱性环境中，酸碱度 pH 值均比游离氧化物的等电 pH 值要高，发挥胶结作用的可能性不大，不会是南北两港软土力学特性存在本质差异的根本原因。

从扫描电镜试验和孔径分布试验结果分析，两种土的微观组构差异较大：南港软土基本单元体成片状絮凝结构，基本单元体之间架空，大于 10μm 的大孔隙占较大比例，构成十分松散的柔性骨架；而北港软土的孔隙主要以 1.0~10μm 孔隙为主，基本不存在大于 10μm 的孔隙，基本单元体间接触点明显增多，孔隙要相对稳定，具有一定的结构强度。

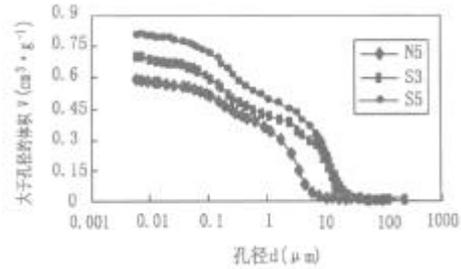


图 5 孔隙分布试验结果



图 6 南港 S3 扫描电镜照片 4000×



图 7 北港 N5 扫描电镜照片 2000×

因此南、北两港软土的工程特性差异主要是由其矿物成分、有机质含量、孔隙结构以及土颗粒间的排列方式不同所引起。

3 结构性的工程效应

从上述实例可见结构性对工程的影响是不容忽视的，在勘察、设计、施工各阶段，结构性会以不同的效应表现出来，如何正确对待这种效应对工程具有重要意义，下面就其中的几个问题进行分析，它们是：结构性与软土的判别、结构性强弱的判定、结构强度的利用问题。

3.1 结构性与软土的判别

关于软土的定义至今尚未统一，有的定义为：“天然孔隙比大于或等于 1.0 且天然含水量大于液限的细粒土应判为软土，包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等，其压缩系数宜大于 0.5MPa^{-1} ，不排水抗剪强度宜小于 30kPa ”。有的定义为：“近代水沉积形成的天然含水量大于液限、天然孔隙比大于 1.0 而小于 1.5 的亚粘土、粘土分别称为淤泥质亚粘土、淤泥质粘土；天然孔隙比大于 1.5 的亚粘土、粘土都称为淤泥”等等^[6]。

这些定义的共同特点是都应用了含水量、孔隙比两个物性指标，由有效应力原理可知，抗剪强度、压缩性与含水量密切相关，那么高含水量、高孔隙比也就意味低抗剪强度和高压缩性，这是长期以来根据软土定义就能联想到的工程性质。但是结构强度的存在使得这些力学指标与物性指标的对应关系出现了变化，要求我们在评价软土的工程特性时应注意与结构性联系起来，重视力学性质在结构破坏前后的变化。比如以往对软土压缩性进行评价的时候，习惯采用压力在 100~200kPa 区间的压缩系数 a_{v1-2} 来评价土的压缩性，根据这一标准，琼州海峡南北两港的软土均属高压缩性土，但事实上两者的压缩特性是迥然不同的。产生这一问题的原因在于以往进行压缩性评价时依据的是图 8 的压缩曲线，随着压力的增大，压缩系数逐渐减小，因此选择加荷中间段的压缩系数就具有平均的意义。但事实上，软土在结构屈服应力前后压缩性发生突变，即所谓的“倒大”^[7]，压缩曲线不存在平均斜率，图 8 的压缩曲线只有在重塑土或扰动非常大的土中才会出现，如图 9。因此在实际应用中应重视结构性对压缩的影响，重视结构强度破坏前后性质的变化，根据工程施加的载荷区间来评价压缩性。

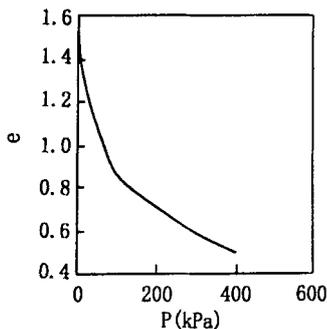


图 8 土的 $e\sim p$ 曲线

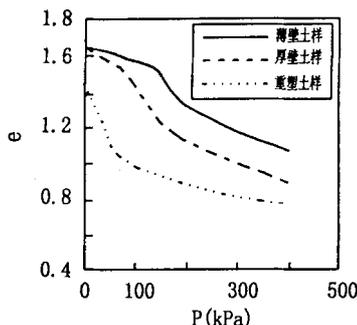


图 9 不同扰动程度土样的压缩曲线

3.2 结构性强弱的判定

实际上结构性是一个模糊的概念，对于某一种土，只能说它的结构性是“强”或“弱”，而无法定量计算出结构性，研究中经常出现的“结构性粘土”就是结构性较强的粘土的简称。土的结构性强弱常常与一些力学参数有对应的关系，表 5 为粘土结构性分类的一种方案，这种分类从强度和硬度对土质进行评价，再结合压缩模量 E_s 对变形模量 E_0 和地基容许承载力 $[R]$ 进行估算^[8]。

表 5 结构性分类

结构性分类	强	中等	弱
无侧限抗压强度 $q_u(\text{kPa})$	100	$50 < q_u < 100$	$25 < q_u < 50$
76g 圆锥仪下沉量 $h(\text{mm})$	2	$2 < h < 5$	$5 < h < 7$

龚晓南^[9]提出：结构屈服应力比 $\sigma_{vy}/\sigma_{v0}=1$ 时，为弱结构性土； $1 < \sigma_{vy}/\sigma_{v0} < N_1$ 时，为较强结构性粘土； $\sigma_{vy}/\sigma_{v0} > N_1$ 时，为强结构性粘土。其中 N_1 为一定值，通过大量试验统计分析得出。这表明，人们试图将土的结构性强弱与一些力学指标建立关系。但由于长期以来对结构性重视不足，且结构性强弱本身具有模糊性难以量化的特点，因此要在实际应用中考虑结构性强弱对各种设计参数的影响，尚有大量的工作要做，而表征结构性强弱判定的指标选取是这项工作的第一步。

原则上讲，结构性对土的绝大部分力学指标都有影响，可以通过它们在结构破坏前后的变化程度来判别结构性的强弱，但一方面这些指标对结构性破坏的敏感程度是不同的，有的指标同时受到其他因素的影响，因而对结构破坏的反应就迟钝一些；另一方面，评价指标不宜太多，以免造成评价的复杂性。在以往的研究中，灵敏度 S_t 是应用较多的表征结构性强弱的指标，它反映的是结构性对土的不排水强度的影响。结构性强弱对抗压缩能力的影响，可采用屈服应力比，但由于这一指标的注意时间较短，积累的资料不足，有待进一步的完善。

3.3 结构强度的利用

从工程角度来说，结构强度的利用对施工方式的选择、施工速率的控制等具有重要的影响。在工程中许多软土需要进行地基处理，它们有的通过土体本身排水固结增长的强度，或通过外加材料改善土质。

排水固结一般要在土体中设置砂井或塑料排水板等竖向排水通道，这样在施工时就不可避免地会对土体扰动产生附加沉降和强度降低，在南京油罐地基中由于插入塑料排水板观测到 30cm 以上的附加沉降^[10]，折学森^[11]根据沪宁、广深珠、杭甬等十多条公路的软土路基的沉降资料比较后发现，软基不作深层排水处理时，采用慢速施工可使地基总沉

降量减小，而对地基作了深层排水处理后，总沉降量增大，图10也验证了这一点。排水系统对土体强度的降低也是十分明显的，施建勇^[12]研究表明在砂井施工后土体的十字板强度平均降低了6kPa。

扰动导致的附加沉降引起一系列问题，如不均匀沉降的可能性增加，填筑工程量的加大和工程造价的增加等；强度的降低则使得地基的安全系数大为减小，使人们对地基稳定性产生担心，有时甚至导致必须采取额外的加固措施。

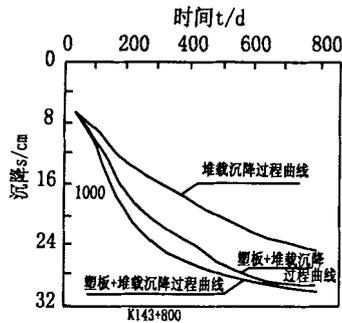


图10 塑料排水板预压与单纯预压沉降过程比较^[13]

而在动力置换中，结构强度是作为不利因素影响设计施工的，因为这种方法是利用软土的含水量高、渗透系数小、不排水强度低的特点，通过快速地向地基表面施加荷载，对土体产生扰动，使结构强度降低，土体中孔隙水压力急剧上升，产生整体剪切破坏，形成连续滑动面，填筑体下的淤泥被强制挤向两侧，填筑体下沉至一定深度，与周围土体形成新的极限平衡状态。于是在这类方法中，如何确保扰动降低土体的强度就成为工程能否顺利进行的重要因素。

由上述分析，土体结构强度的合理利用能缩短工期、减少工程量，更为重要的是它对某些工程的安全及成败起着关键的作用，在实践中应结合具体工程进行分析，以保证工程的顺利实施。

4 结论

(1) 天然软土都具有结构性，琼州海峡防波堤爆破挤淤的例子表明结构性对土的工程效应有重要影响。

(2) 对结构性与软土的判别、结构性强弱的判定、结构强度利用几个问题进行了初步的探讨，指出了结构性工程效应的复杂性。

参 考 文 献

- [1] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays. *Geotechnique*, 1990,40(3):329-378.
- [2] 沈珠江. 软土工程和软土地基设计[J]. *岩土工程学报*, 1998,20(1): 100-11.
- [3] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. *岩土工程学报*, 1982,4(1):34-35.
- [4] 张诚厚. 两种结构性粘土的土工特性[M]. *水利水运科学研究*, 1983,(4):65-71.
- [5] 岩土工程勘察规范(GB50021-94)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1995.
- [6] 港口工程技术规范(JTJ219-87)[S]. 北京:人民交通出版社, 1987.
- [7] 冯铭璋. 软土压缩曲线特征[J]. *岩土工程学报*, 1992,14(9):95-100.
- [8] He K S, Yuan W M, Shen Z J. Treatment of a thick soft ground under large oil tanks by preloading method. 2nd Int. Conf. On Ground Treatment Techniques[C]. Macau, 1997.
- [9] 常士骝, 张苏民等. 工程地质手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1992.
- [10] 龚晓南. 粘土结构性对其力学性质的影响及其形成原因分析[J]. *水利学报*, 2000,10:43-47.
- [11] 折学森. 软土地基沉降计算[M]. 北京:人民交通出版社, 1998.
- [12] 施建勇等. 考虑砂井施工初始损伤路基沉降的粘弹塑性分析研究[J]. *岩土工程师*, 1996,8(3):13-17.
- [13] 刘松玉等. 软土地基上高速公路建设的主要岩土工程问题与对策[J]. *地基处理*, 1999,10(2):3-18.

Engineering Effect of Soft Soils Structural Property

LU Hai-bo^{1,2}, WANG Ren², ZHAO Yan-lin¹, KONG Ling-wei²

(1. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract In Qiongzhou Strait railway ferry project, it is discussed. It is found that the soft soils structural property is responsible for the problems arising in underwater explosion and the engineering effect of soft soils structural property is discussed.

Key words soft soils, structural property, engineering effect