

土的压缩模量随荷载的变化规律分析

黄 雄, 郭玉华, 区少凤

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东广州 510230)

摘要: 目前, 土的压缩模量被认为是一个近似常数的做法是不合理的。结合港珠澳大桥工程室内压缩试验成果, 分析不同应力区间和不同应力路径下土的压缩模量变化规律, 并分析不同条件下的压缩模量变化幅度, 为土的变形计算参数取值提供参考。

关键词: 压缩模量; 土的变形; 变形参数

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)07-0095-05

Evolution law of compression modulus of soil under loads' changing

HUANG Xiong, GUO Yu-hua, OU Shao-feng

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: It's unreasonable that the compression modulus is considered as an almost constant at present during the compression estimation and deformation calculation of soils. Combining the geotechnical test results in project of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge, we analyze the evolution law of compression modulus under loads' changing, and discuss the evolution range of compression modulus under different loads. It may serve as reference for deformation calculation parameters of soils.

Key words: compression modulus; deformation calculation of soil; deformation parameter

在土的变形计算和分析中, 压缩模量是一个重要的参数。

从概念上说, 压缩模量应该由施加的荷载与荷载产生的瞬间变形求得, 但实际的做法是加载后待孔压为0时按 $E_s = \sigma_1 / \epsilon_1 = (1 + e_p) / \alpha_v$ 计算而来。压缩模量在孔压消散过程中的变化常常被忽略。同时, 土是一种具有压密性质的材料, 不同的压力区间段, 其压缩模量不同。此外, 土还是一种具有路径效应的材料, 应力路径不同则其压缩模量也不尽相同。然而, 在地基沉降计算中一般仍认为土的压缩模量在某荷载区间内为一定值, 这可能是造成变形计算值和实际值相差较大的重要原因。

目前国内对土的压缩模量随荷载的变化分析

成果主要有: 1) 罗嗣海^[1]、杜兆成^[2]等针对压缩模量公式中的 e_p 取值进行分析, 提出压缩模量更为合理的表达式; 2) 陈孝培^[3]等提出压缩模量补偿系数; 3) 周翠英^[4]等分析了压缩模量随荷载大小、时间变化的动态规律, 等等。从已搜集的文献来看, 尚未有考虑应力路径对压缩模量影响关系的研究成果。

在港珠澳大桥岛隧工程勘察项目中, 进行了一大批高质量的压缩试验, 得到了大量有关压缩模量的试验数据。同时, 我们对同组试样分别进行了2次卸荷循环和5次卸荷循环的非常规高压回弹试验, 以此可以用来分析压缩模量随荷载、随应力路径(加压-卸压循环)的变化关系。

收稿日期: 2013-05-02

作者简介: 黄雄(1981—), 男, 硕士, 主要从事岩土测试工作。

1 试样的基本参数和试验安排

选取的土样均取自港珠澳大桥岛隧工程区沉管隧道底部高程附近, 主要为黏性土或粉土, 灰色, 硬塑, 夹多层薄层粉细砂, 表现出较大的不

均匀性; 但同组试样取自同一土样的连续位置, 土性变化较小, 具有可比性。全部土样均采用固定活塞薄壁取土器进行取土。主要的物理性质参数见表1。

表1 试样的主要物理性质参数

土样编号	试样深度/m	含水率/%	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数	试验安排
T4-24	23.3	35.7	1.79					a
T4-24-1	22.9	35.7	1.83	39.4	22.8	16.6	0.78	b
T10-12	13.1	41.1	1.79					a
T10-12-1	12.7	41.1	1.80	55.2	26.4	28.8	0.51	b
T27-46	40.8	37.8	1.81					a
T27-46-1	40.6	39.5	1.80	44.8	26.4	18.4	0.62	b
T28-37	39.3	31.3	1.89					a
T28-37-1	39.1	29.2	1.86	32.7	17.9	14.8	0.91	b
T31-17	16.8	51.3	1.71					a
T31-17-1	16.5	50.7	1.71	63.6	25.5	38.1	0.68	b
T34-28	27.8	37.2	1.80					a
T34-28-1	27.6	35.9	1.83	49.0	23.0	26.0	0.55	b
T39-38	41.6	34.3	1.84					a
T39-38-1	41.4	33.7	1.76	42.4	23.9	18.5	0.53	b

力学试验为逐级加载固结试验, 共安排了2种应力路径的压缩试验:

a) 2次卸荷回弹压缩试验: ①从初始荷载开始, 逐级加载至现场原位应力; ②逐级卸载至初始荷载; ③重新加载至仪器最大荷载; ④再次卸载至初始荷载。

b) 5次卸荷回弹压缩试验: ①从初始荷载开始, 逐级加载至现场原位应力; ②逐级卸载至初始荷载; ③重新加载至前期固结压力; ④再次卸载至原位应力; ⑤再次加载至前期固结压力; ⑥再次卸载至原位应力的一半; ⑦再次加载至前期固结压力; ⑧再次卸载至初始荷载; ⑨再次加载至最大荷载; ⑩再次卸载至初始荷载。

2 试验成果的整理与分析

2.1 压缩模量随荷载区间的变化而变化

压缩模量随荷载大小的不同而变化已属公论。一般认为, 对于重塑土有:

$$E_{s0.1-0.2} < E_{s0.2-0.4} < E_{s0.4-0.8} < E_{s0.8-1.6} < E_{s1.6-3.2};$$

而对于原状土, 由于需要考虑前期固结压力和结构屈服压力的影响, 其规律变得较为复杂。

1) 不同的荷载区间实际上反映的是荷载与土的前期固结压力和结构屈服压力的不同组合, 此时 E_s 将会得到不同的取值(图1)。

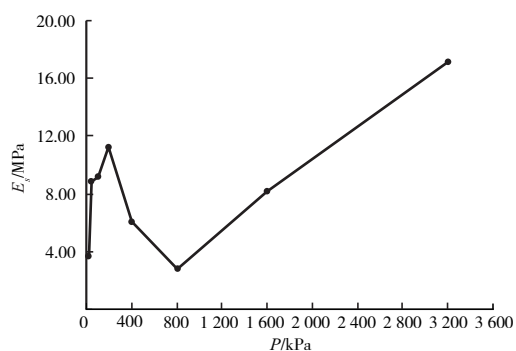


图1 T31-17试样的 E_s - P 关系曲线

从图1可见: 对于典型试样T31-17, 随着荷载 P 的增加, 压缩模量 E_s 可划分为如下5个阶段:

1) 应力释放补偿阶段(0~50 kPa): 由于取样和制样过程产生的应力释放, 导致第一级荷载下的压缩模量很小, 在 E_s - P 曲线上则变现为 E_s 的迅速增长, 后期拐点处或许可以认为是应力释放已经得到补偿。

2) 结构屈服前的压缩阶段(约50~200 kPa): 此时 E_s 的增长较1)阶段缓慢, 为近弹性压缩阶段,

可作为结构破坏前的土体变形设计参数。

3) 结构屈服阶段(约200~400 kPa): 此时 E_s 迅速下降, 前期固结压力即存在于两者之间。这一点与 $e-\lg P$ 曲线上按卡萨格兰德法求得的前期固结压力一致(图2), 前期固结压力为370 kPa。

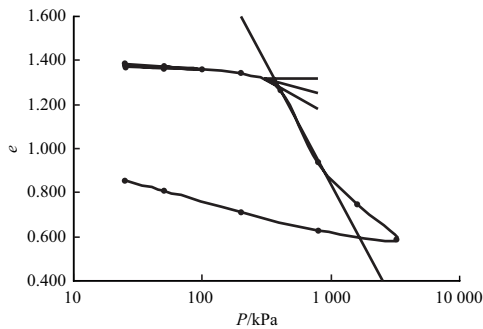


图2 T31-17试样的 $e-\lg P$ 曲线

4) 结构屈服强化阶段(约400~800 kPa): 此时 E_s 仍然呈现出下降的趋势, 土体结构得到进一步的破坏, 但这一阶段 E_s 下降的速度较之3) 已经变缓; 后期拐点的模量可作为破坏过程的设计参数;

5) 结构屈服后的压缩阶段(800 kPa以后): 此后与重塑样的变化相同, E_s 随荷载的增加逐渐增长, 开始表现为土中孔隙压缩, 随后为孔隙压缩和土颗粒变形共同作用; 可根据荷载的大小选择相应的变形设计参数。

图3为全部试样的 E_s-P 关系曲线, 基本上与典型曲线规律表现相同或相近(有时会由于加载比过大而错过结构屈服阶段), 表2为全部试样在 $e-\lg P$ 曲线上求得的前期固结压力值。

表2 各试样的前期固结压力值

试样	P_c/kPa
T4-24	290
T10-12	340
T27-46	520
T28-37	580
T31-17	370
T34-28	380
T39-38	480

2) 由于土属于弹塑性体, 弹性和塑性变形总是同时发生。故不同的荷载区间长度也会得到不同的压缩模量取值。选取各试样荷载序列中第②级与第③级、第②级与第④级的沉降值计算压

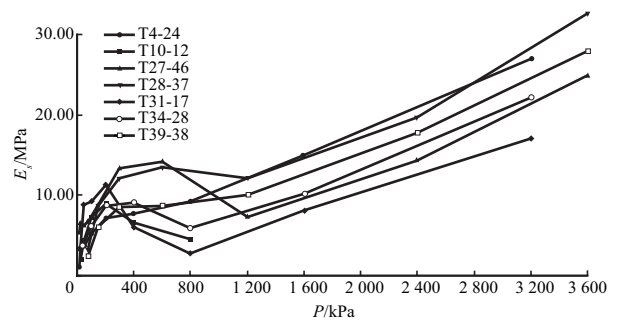


图3 E_s-P 关系曲线

缩模量(第①级试验有可能产生接触问题或回弹问题), 结果见表3所示。

表3 不同荷载区间长度的压缩模量比较

试样编号	荷载区间/kPa	压缩模量/MPa	压缩模量变化幅度/%
T4-24	25~50	3.62	21.3
	25~100	4.60	
T10-12	25~50	4.28	28.2
	25~100	5.96	
T27-46	25~50	6.22	4.4
	25~75	6.51	
T28-37	75~150	8.68	19.5
	75~300	10.79	
T31-17	25~50	8.87	2.4
	25~100	9.08	
T34-28	50~100	6.17	19.6
	50~200	7.67	
T39-38	75~150	6.09	19.4
	75~300	7.56	

从表3中可以看出: 选择不同的荷载区间长度也会对压缩模量计算结果产生很大的影响, 在此处情况下压缩模量变化幅度平均达16.4%, 假如此时按分层总和法进行土的变形计算, $\Delta s = H\Delta P/E_s$, 则计算误差将高达16.4%。再次证明了土的变形计算中 E_s 的荷载区间选取应该尽量与现场的加卸载条件一致。例如, 假设原位荷载为120 kPa, 附加荷载为60 kPa, 则应选取120~180 kPa荷载区间的 E_s 值, 而取100~200 kPa荷载区间的 E_s 值将会产生较大的误差。

2.2 压缩模量随应力路径的变化而变化。

1) 应力路径a和b之后的压缩模量对比。

土体在经历不同的应力路径之后将表现出不同的压缩性质, 需要考虑前期承受的最大荷载和加卸载循环次数对压缩模量的影响。

图4为相同试样经历2次卸荷回弹和5次卸荷回弹（见第2节中的应力路径*a*和*b*）之后的压缩模量对比图。

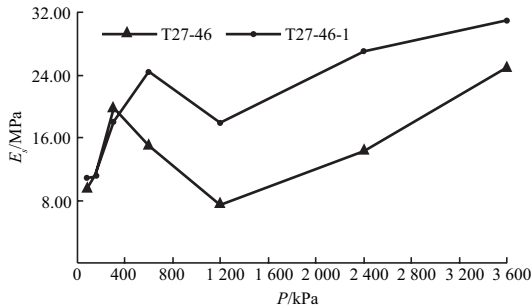


图4 典型的2次卸荷回弹和5次卸荷回弹之后的压缩模量对比

试样T27-46和试样T27-46-1为同一土样制取的两个试样，前者经历了2次卸荷回弹（路径*a*），后者经历了5次卸荷回弹（路径*b*）；图中的实线为经历2次卸荷回弹之后的再压缩模量曲线，虚线为经历5次卸荷回弹之后的再压缩模量曲线。从图中可见：

①由于T27-46前期固结压力为520 kPa（表2）而T27-46-1之前承受的最大荷载为600 kPa，所以后者的下降起始点较之前者后移。

②两者下降起始点位置不同，但在下降之前（也就是前期固结压力之前），两者基本上无差别；也就是说已经经历结构屈服的试样（T27-46-1）在多次循环荷载后的压缩模量能基本上得到恢复。

③前期固结压力之后，经历较大荷载并且多次循环的T27-46-1具有较大的压缩模量。

图5为全部试样的不同应力路径之后的压缩模量对比曲线，基本上与典型曲线表现出相同或相近的规律。

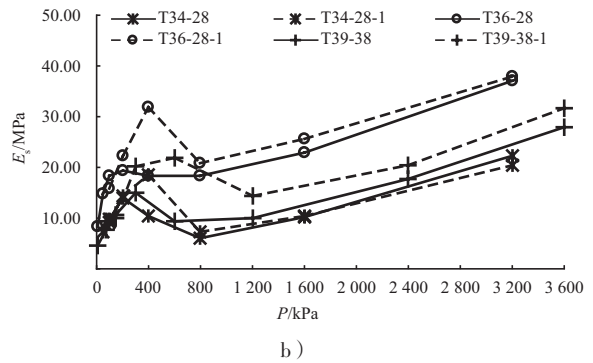
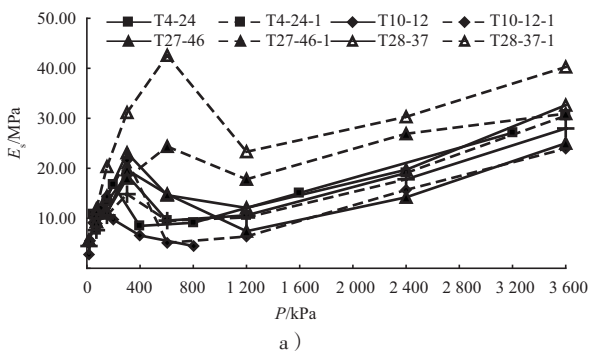


图5 2次卸荷回弹和5次卸荷回弹之后的压缩模量对比

2) 应力路径*b*的不同循环次数之后的压缩模量对比。

对于经历多次加卸载循环的试样，在不同循环次数之后的再加载压缩模量必将不同并表现出一定规律，图6和图7即为经历应力路径*b*的不同循环次数之后的压缩模量对比图。

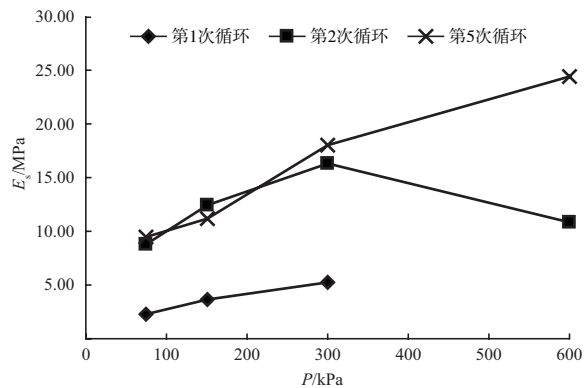


图6 典型的的不同循环次数之后的压缩模量对比

图6中试样T27-46-1经历了5次循环荷载（路径*b*），由于第3次循环和第4次循环加卸载步骤过少，故只给出了第1, 2, 5次循环中的再加载压缩模量。从图中可见：

1) 第1次循环的压缩模量较小，究其原因当土样从原位取出地面时，并在运送、保存、制样过程中由于应力释放造成的。

2) 第2次循环加载压缩模量比第1次循环时大约3倍，至600 kPa时已超过前期固结压力（520 kPa，见表2），试样发生结构屈服，故此时压缩模量突然下降。

3) 经历第3, 4次循环后，土样的密实度和结构性得到一定程度的恢复，故第5次循环再加载压

缩模量也远比第1次循环时大,且在600 kPa时未出现压缩模量突然下降,但继续加载可看到此现象。

图7为全部试样的不同循环次数之后的压缩模量对比曲线图,各试样基本上表现出与上述相同或相近的规律。

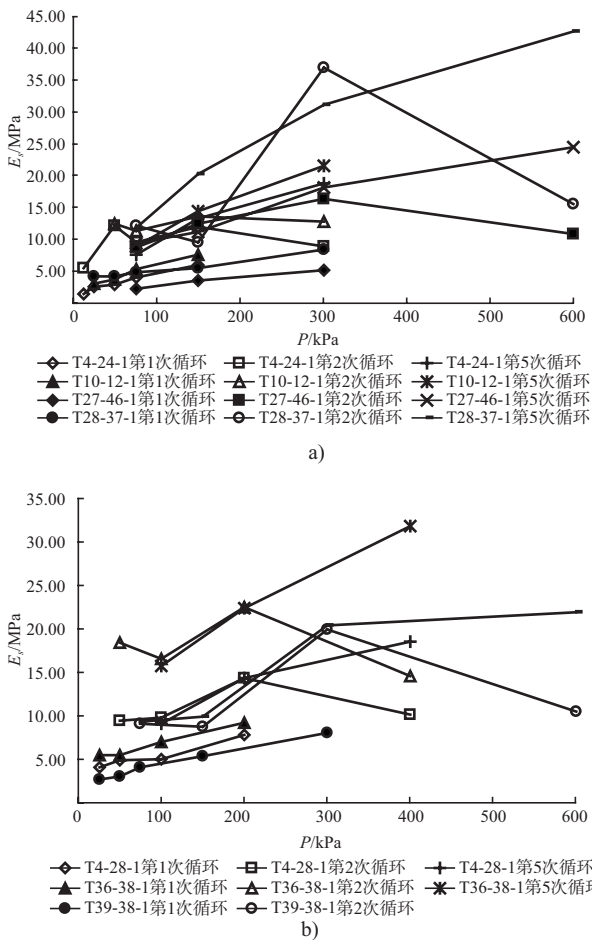


图7 不同循环次数之后的压缩模量对比

3 结论

1) 不同荷载区间将得到不同的压缩模量取值,压缩模量在前期固结压力(结构屈服应力)

的前后变化呈现不同的规律,可以将整个变化过程分为5个阶段:应力释放补偿阶段、结构屈服前的压缩阶段、结构屈服阶段、结构屈服强化阶段、结构屈服后的压缩阶段。

2) 不同的荷载区间长度也会得到不同的压缩模量取值,而且影响变化的幅度较大。

3) 不同应力路径之后的再压缩过程将得到不同的压缩模量值,主要受前期最大荷载和加卸载循环次数的影响:已经经历结构屈服的试样在多次循环荷载后的压缩模量能基本上得到恢复;前期最大荷载之后的压缩模量随最大荷载值和加卸载循环次数的增加而增加。

4) 对于经历多次加卸载循环的试样,在不同循环次数之后的再加载压缩模量的一般规律为:第1次循环的压缩模量较小,究其原因是应力释放造成的,之后各循环的压缩模量可比第1次时大好几倍;压缩模量与前期承受的最大荷载的关系符合与单一加载的压缩试验结果相同。

参考文献:

- [1] 罗嗣海. 基础最终沉降量计算中的 E_s 取值[J]. 工程勘察, 1995(6): 20-22.
- [2] 杜兆成, 李晶. 土压缩模量计算公式的探讨[J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2003, 4(3): 30-32.
- [3] 陈孝培, 甘德福. 论软土地基压缩模量 E_s 的定值问题[J]. 工程勘察, 1999(6): 18-20.
- [4] 周翠英, 林春秀, 林鲁生, 等. 外荷载作用下软土压缩模量的动态演化规律研究[J]. 岩土力学, 2010(7): 2 040 - 2 044.
- [5] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.

(本文编辑 郭雪珍)