



循环荷载波形变化对结构性软土变形及能量特性的影响

郭 飞

(中交天津航道局有限公司, 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300461)

摘要: 针对循环荷载波形变化对结构性软土变形的影响, 以天津滨海新区临港工业区海积软土为研究对象, 对其土样施加不同波形、不同幅值的循环荷载, 并对不同波形、不同幅值作用下软土的耗散能发展曲线进行研究, 并提出两种发展模式下的结构性软土耗散能的演化方程。结果表明, 在考虑荷载波形的情况下, 循环荷载幅值较小(30 kPa)时, 累积塑性应变发展缓慢, 波形变化对塑性应变发展趋势的影响很小; 循环荷载较大(40、60、80 kPa)时, 累积塑性应变快速增加, 方波荷载作用下的累积塑性应变发展最快, 正弦波荷载次之, 三角波荷载作用下的塑性应变发展最慢。

关键词: 结构性软土; 加载波形; 能量特性; 变形特性

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0185-06

Effect of cyclic loading waveforms on deformation and energy characteristics of structural soft soil

GUO Fei

(CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., CCCC (Tianjin) Ecological Environmental Protection Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: For investigating the effect of cyclic loading waveforms on deformation of structural soft soil, we take the marine soft soil of Lingang industrial area in Tianjin Binhai new area as the research object, carry out the cyclic loadings with varying waveforms and amplitudes to the samples, research the dissipated energy curves of structural soft soil are researched under cyclic loadings with varying waveforms and amplitudes, and propose the evolution equations in two cases. The results show that when the effect of the loading waveform is considered, the cumulative plastic strain develops slowly, and the change of the waveform has little effect on the development trend of plastic strain when the loading amplitude is below the threshold stress, for example, 30 kPa. When the amplitude is much higher than the threshold, for example, 40 kPa, 60 kPa, and 80 kPa, the cumulative plastic strain increases rapidly, the rate of deformation for the square wave is fastest, and the sinusoidal wave comes the second, while the triangular wave is the last.

Keywords: structural soft soil; loading waveform; energy characteristics; deformation characteristics

天津滨海地区分布有深厚的软黏土地层。软土具有含水率、孔隙比高, 工程沉降变形大的特点, 对工程建设具有较大的影响, 尤其在循环荷载作用下, 软土地区的变形破坏更成为不容忽视的危害点。

针对软土的上述特性, 不少学者对软土在循环荷载作用下的强度、刚度及变形等动力特性展开研究。周建等^[1]通过对结构性土样开展动力特性研究, 得出考虑土体超固结比、循环应力幅值及振动频率耦合作用时的结构性土刚度软化方程。

Koutsoftas 等^[2]则得出不同的研究结论, 通过对不同影响因素, 认为超固结比对结构性土体刚度软化影响不大。黄茂松等^[3]对软黏土的研究结果表明, 相同循环荷载动应力比作用下, 试验固结围压和偏应力能够有效减缓软黏土刚度的弱化, 并在综合考虑动应力幅值、静偏应力和固结围压的情况下, 引入动偏应力参数来描述软土刚度弱化过程。Rahhal 等^[4]在研究软土循环荷载作用下的软化现象后认为, 结构性土存在临界循环应变, 当试验应变值小于临界值时, 土体累积应变趋于稳定, 不会发生刚度软化现象; 当循环应变大于临界值时, 累积塑性应变迅速增加, 土体发生刚度软化现象。黄茂松等^[5]基于临界状态土力学理论, 考虑多因素耦合作用下上海地区饱和软黏土的累积塑性应变的变形特性。沈扬等^[6]探讨了交通荷载导致的主应力旋转作用下, 软土的累积塑性应变发展规律, 并综合考虑主应力旋转角、试验围压和静偏应力对软土累积塑性应变的影响。蔡袁强等^[7]研究双向循环应力作用下的杭州萧山软黏土动力特性, 双向激振作用下, 软黏土存在径向循环荷载临界值; 与单向循环荷载作用相比, 双向循环荷载作用下, 土体累积塑性应变增长更快, 更易发生破坏。吴建奇等^[8]在综合考虑固结应力、循环应力比和试验围压的条件下, 对赣南红黏土累积变形特性进行研究, 并建立考虑不同影响因素的累积塑性应变增长模型。郭林等^[9]重点研究试样固结围压对结构性软土动力响应的影响, 即当试验固结围压较低时, 结构性软土表现出较高的归一性, 当试验围压超过一定限制, 试验固结阶段, 结构破坏, 软土动力特性降低。陈成等^[10]对昆明泥炭质土研究后认为, 动应力幅值和静偏应力是影响泥炭质土长期动力特性的主要因素, 初始固结压力对累积变形影响较小, 但对试样残余孔压的影响显著。

然而, 以上对软土在循环荷载作用下应变软化的研究, 试验时所施加的循环荷载大多数为正弦波荷载。众所周知, 不同工况所对应的荷载波形并不相同^[11-12]。基于此, 本文通过对天津滨海

软土施加方波、正弦波、三角波 3 种波形的循环荷载, 探讨荷载波形对滨海软土变形特性的影响, 并对比不同波形荷载作用下的软土能量耗损情况, 总结出软土耗散能演化方程。

1 试验方法和研究内容

1.1 试验仪器

不同波形循环荷载作用下的软土动力响应试验在 GCTS 公司产的空心圆柱扭剪仪上完成, 该仪器采用较为先进的伺服加载系统实现力和位移的静态和动态加载。通过对轴向应力、围压、反压、内围压以及扭矩独立控制, 实现复杂应力路径下静力、动力荷载的准确施加。试验仪器如图 1 所示。



图 1 GCTS 空心圆柱扭剪仪

1.2 试验土样

试验所用原状结构性软土取自天津滨海新区临港工业区, 测得的土样基本物理力学指标: 含水率 ω 为 41.4%, 孔隙比 e 为 1.18, 液限 W_L 为 45.5%, 塑性指数 I_p 为 21.6, 黏聚力 c 为 12.5 kPa, 内摩擦角 φ 为 7.5°, 原状土抗剪强度 c_u 为 21.9 kPa, 重塑土抗剪强度 c'_u 为 8.1 kPa, 灵敏度 S 为 2.7。

试验结果表明, 取自滨海新区临港工业区的海积软土含水率高、孔隙比大、黏性大、抗剪强度指标低。采用十字板剪切试验对现场原状结构性软土和室内重塑土进行试验, 结构性软土灵敏度中等, 存在较强的结构性。

1.3 试验方案

土样制备完毕后经过饱和固结过程后在不排水条件下进行循环三轴试验, 方案见表 1。

表1 不排水循环荷载试验方案

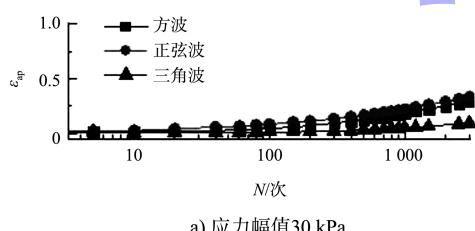
土样	编号	σ'_c /kPa	σ_d/σ'_c	波形
原状样	S-1			方波
	S-2	100	0.3	正弦波
	S-3			三角波
	S-4			方波
	S-5	100	0.4	正弦波
	S-6			三角波
	S-7			方波
	S-8	100	0.6	正弦波
	S-9			三角波
	S-10			方波
	S-11	100	0.8	正弦波
	S-12			三角波

注: σ'_c 为有效固结压力, σ_d 为循环荷载应力幅值。

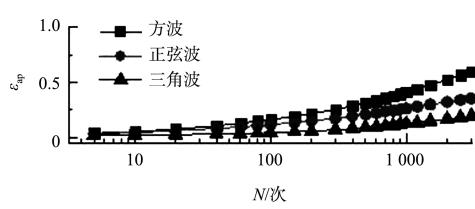
2 循环荷载对软土轴向变形影响

2.1 荷载波形对累积塑性应变的影响

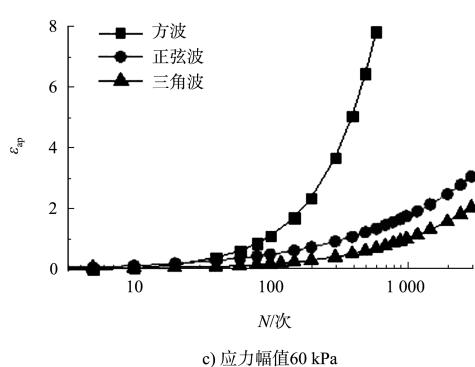
对软土试样施加应力幅值为 30、40、60、80 kPa 的循环荷载, 荷载波形分别为方波、正弦波和三角波。不同试验荷载情况下累积塑性应变随振次的变化曲线如图 2 所示。



a) 应力幅值30 kPa



b) 应力幅值40 kPa



c) 应力幅值60 kPa

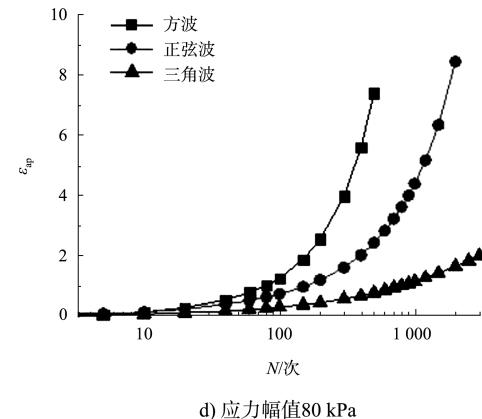


图2 不同应力幅值作用下试样轴向累积塑性应变
 ε_{ap} -循环振次 N 关系曲线

试验结果表明, 循环荷载幅值较小(30 kPa)时, 累积塑性应变发展缓慢, 不同波形循环荷载作用下, 塑性应变曲线近乎重合, 波形变化对塑性应变发展趋势的影响很小。

循环荷载较大(40、60、80 kPa)时, 伴随着应力幅值的增加, 累积塑性应变快速增加; 应力幅值相同时, 方波荷载作用下的累积塑性应变发展最快, 正弦波荷载次之, 三角波荷载作用下的塑性应变发展最慢。

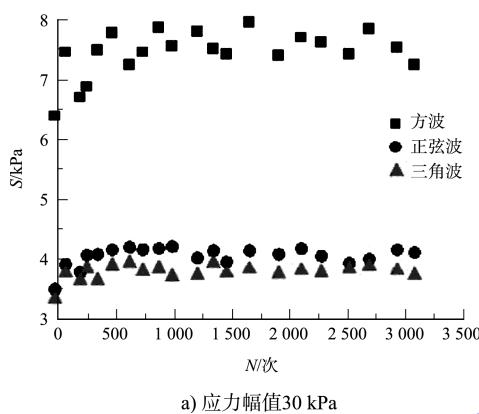
结合以往学者对结构性软土的研究成果, 软土结构存在循环荷载临界值, 即荷载应力幅值低于临界值时, 结构性软土不会发生破坏; 荷载应力幅值超过临界值时, 结构性软土发生破坏。图 2 的试验结果表明, 循环荷载波形变化会影响结构性软土的循环荷载临界值, 如方波荷载作用下软土临界值在 40~60 kPa, 正弦波荷载作用下软土临界值为 60 kPa 左右, 三角波荷载作用下软土临界荷载最大。

由于不同波形循环荷载对应的振动能量不同, 上述试验成果表明, 循环荷载应力幅值较低时, 不同波形循环荷载整体上对结构性软土的作用效能差异不大, 软土累积塑性应变发展趋势基本一致。循环荷载应力幅值超过临界值时, 方波荷载能量最大, 对结构性软土破坏性最强, 累积塑性应变发展最快; 正弦波荷载能量次之, 累积塑性

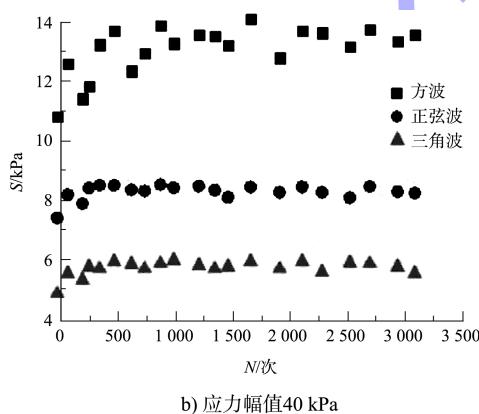
应变发展速率次于方波荷载；三角波荷载对应的能量最小，因而破坏所需振动幅值也最大。

2.2 荷载波形对耗散能的影响

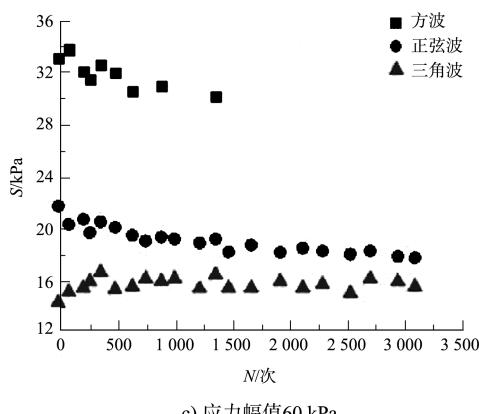
在外力作用下，软土试样吸收的能量一部分转换为弹性应变能，另一部分转换为耗散能，包括热能、声能，以及产生塑性应变。滞回曲线表征循环荷载作用下，软土试样的应力-应变关系，同时伴随着累积塑性应变的发展。由于热能、声能在耗散能中占比很小，因此本文以滞回曲线面积表征耗散能变化，如图 3 所示。



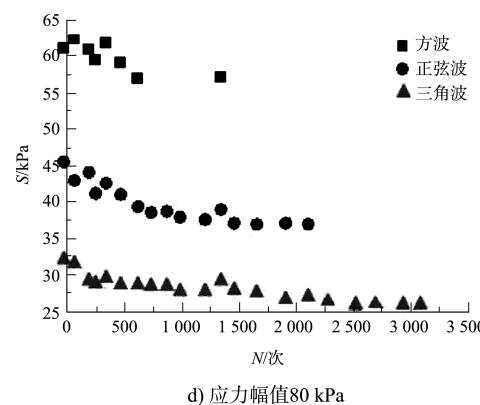
a) 应力幅值30 kPa



b) 应力幅值40 kPa



c) 应力幅值60 kPa



d) 应力幅值80 kPa

图 3 不同循环应力下滞回曲线面积 S-循环振次 N 关系曲线

试验结果表明，相同荷载应力幅值作用下，方波荷载对应的耗散能最高，正弦波次之，三角波最低。

当试样未发生破坏时，耗散能发展分为上升和平稳两个阶段，如图 3a)~c) 中三角波荷载曲线所示。这主要是因为荷载作用较小时，初始阶段对结构性软土起到“压密”作用，耗散能增加；伴随着振次增加，土体结构相对完整，外力做功转化为弹性能，耗散能趋于平稳。

当试样发生破坏时，耗散能分为陡降和残余两个阶段，如图 3d)、c) 中方波、正弦波荷载曲线所示。笔者认为，荷载较大，超过土体荷载临界值，初始阶段，软土结构即发生破坏，造成软土试样耗散能随振次的发展逐渐降低，最终导致试样发生破坏。

3 结构性软土耗散能演化方程

Lazan^[13]通过对金属、混凝土及聚合物等材料进行大量的试验研究发现，材料的单位体积耗散能与循环振次、最大正应力幅值之间存在较为密切的关系。何明明等^[14]对岩石动力特性研究表明，耗散能与循环振次、荷载应力振幅存在幂函数关系。

笔者对结构性软土的试验成果进行分析后认为，由于软土结构性的存在，土样未发生破坏与土样破坏，耗散能的发展趋势完全不同，单纯用

幂函数关系表征耗散能并不符合实际。

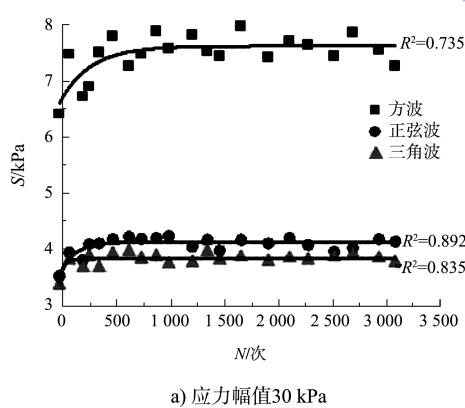
通过大量数据分析, 当结构性软土未发生破坏, 耗散能曲线分为上升段和平稳段, 此时用指数函数表征耗散能随循环振次的变化关系, 见式(1); 当结构性软土发生破坏, 耗散能曲线分为陡降段和残余段, 此时用幂函数表征耗散能曲线关系, 见式(2)。

$$S = A + B \cdot e^{-N/C} \quad (1)$$

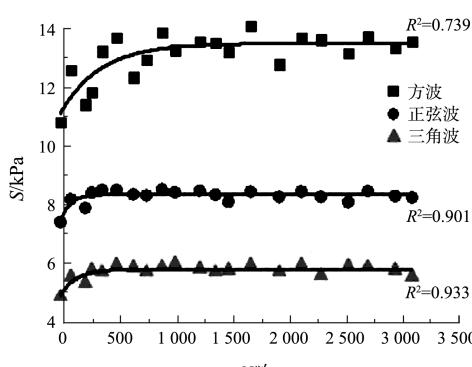
$$S = A \cdot N^B \quad (2)$$

式中: S 为滞回曲线面积; N 为循环振次; A 、 B 、 C 为拟合参数。

拟合结果如图 4 所示。拟合结果表明, 式(1)能够完整地反映结构性软土试样未发生破坏的情况下, 初始阶段耗散能的上升过程; 而式(2)能够反映软土结构发生破坏的情况下, 初始阶段耗散能陡降的过程。上述公式拟合优度高, 能够完整反映耗散能的发展趋势。



a) 应力幅值30 kPa



b) 应力幅值40 kPa

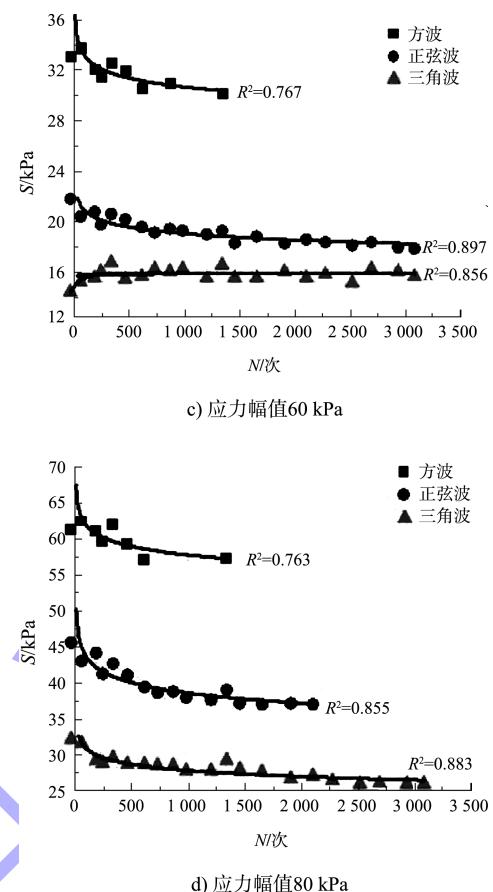


图 4 不同循环应力下 S - N 拟合曲线

4 结论

1) 循环荷载幅值较小(30 kPa)时, 累积塑性应变发展缓慢, 波形变化对塑性应变发展趋势的影响很小; 循环荷载较大(40、60、80 kPa)时, 累积塑性应变快速增加; 应力幅值相同时, 方波荷载作用下的累积塑性应变发展最快, 正弦波荷载次之, 三角波荷载作用下的塑性应变发展最慢。

2) 相同荷载应力幅值作用下, 方波荷载对应的耗散能最高, 正弦波次之, 三角波荷载对应的耗散能最低。

3) 当结构性软土未发生破坏, 耗散能曲线分为上升段和平稳段, 此时用指数函数表征耗散能随循环振次的变化关系; 当结构性软土发生破坏, 耗散能曲线分为陡降段和残余段, 此时用幂函数表征耗散能曲线关系。

4) 目前, 荷载波形变化对结构性软土的影响研究还很少, 其主要的难点在于如何将循环荷载

的波形变化予以量化。本文以滞回曲线面积量化荷载波形, 尚须进一步完备, 对于文中所提出的耗散能表征公式的拟合参数意义及变化规律, 是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软粘土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 75-78, 82.
- [2] KOUTSOFTAS D C, FISCHER J A. Dynamic properties of two marine clays[J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1980, 106(6): 645-657.
- [3] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1491-1498.
- [4] RAHHAL M E, LEFEBVRE G. Characterizing shear moduli reduction in soils cyclic behavior[C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of American Society of Civil Engineers GeoCongress 2006. Reston: ASCE, 2006: 1-5.
- [5] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 891-895.
- [6] 沈扬, 陶明安, 王鑫, 等. 交通荷载引发主应力轴旋转下软黏土变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1569-1578.
- [7] 蔡袁强, 王军, 海钧. 双向激振循环荷载作用下饱和软

(上接第 163 页)

2) 该模型以数理统计为基础, 通过对大量历史数据进行分析, 应用动态二叉数算法, 将拥堵的风险转移至上游各船闸, 对风险进行分流, 减少了总体风险。其运算结果, 为航运管理部门安全保障和航运资源的优化提供了切实可行的定量依据和决策支持。

参考文献:

- [1] 王小平, 齐欢, 肖恒辉, 等. 基于串联排队网络的三峡-葛洲坝水利枢纽联合调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2006(3): 82-86.
- [2] CARROLL J L, BRONZINI M S. Waterway transportation

黏土强度和变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 495-504.

- [8] 吴建奇, 谢栎, 徐旭. 变围压条件下饱和红黏土动力特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 17-23, 44.
- [9] 郭林, 蔡袁强, 王军, 等. 长期循环荷载作用下温州结构性软黏土的应变特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2249-2254.
- [10] 陈成, 周正明, 张先伟, 等. 循环荷载作用下泥炭质土动力累积特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1247-1255.
- [11] HYODO M, YASUHARA K. Analytical procedure for evaluating pore-water pressure and deformation of saturated clay ground subjected to traffic loads[C]//LEE S L, LO K W, CHANG L K. Proceedings of the sixth international conference on numerical methods in geomechanics. Rotterdam: A A Balkema, 1988: 653-658.
- [12] 曹勇, 孔令伟, 杨爱武. 海积结构性软土动力性状的循环荷载波形效应与刚度软化特征[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 583-589.
- [13] LAZAN B J. Damping of material and members in structural mechanics[M]. Oxford: Pergamon Press, 1968.
- [14] 何明明, 陈蕴生, 李宁, 等. 单轴循环荷载作用下砂岩变形特性与能量特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(8): 1805-1812.

(本文编辑 王璁)

simulation models: development and application[J]. Water resources research, 1973, 9(1): 51-63.

- [3] ADHIKARI G, BAE K H, EVANS G, et al. Simulation analysis of the Ohio River waterway transportation system[C]// Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference. Nashville: [s. n.], 2014: 2612-2621.
- [4] 商剑平, 吴澎, 唐颖. 基于计算机仿真的船闸联合调度方案研究[J]. 水运工程, 2011(9): 199-204.
- [5] 刘俊涛, 庞雪松, 潘荣友. 长洲枢纽三线四线船闸平面布置研究[J]. 水道港口, 2013, 34(1): 66-72.

(本文编辑 武亚庆)