

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

曹 勇¹, 孔令伟¹, 杨爱武^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 天津城市建设学院土木工程学院, 天津 300384)

摘 要: 长期循环荷载下, 结构性软土的力学变形特性已被广泛研究。但以往的研究主要集中在一种循环荷载波形下结构性软土的动力特性, 而原状软土地基实际上承受着不同的外部循环荷载, 如地震、高速交通、波浪荷载、油罐及水库液面的升降等, 其等效的循环波形不同。通过应力控制式动三轴试验, 分别在方形波、三角形波和正弦波 3 种循环荷载作用下, 考虑加载次数、振动幅值、振动频率等因素的影响, 对海积结构性软土的动力特性与变形特征进行分析, 并类比了在不同循环荷载波形下软土刚度软化性状; 通过借鉴由循环剪切模量定义的软化指数, 分析出 3 种波形下软化指数随着振动次数的变化规律, 得出在 3 种循环荷载下海积结构性软土的刚度软化过程。

关键词: 海积结构性软土; 循环荷载波形; 刚度软化

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)03-0583-07

作者简介: 曹 勇 (1985-), 男, 江西九江人, 博士研究生, 主要从事土动力学方面的研究工作。E-mail: caoyong10000@163.com。

Waveform effect of cyclic loading of dynamic character and stiffness degradation characteristics of marine deposited natural soft clay

CAO Yong¹, KONG Ling-wei¹, YANG Ai-wu^{1,2}

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China; 2. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China)

Abstract: Dynamic characteristics of natural soft clay under long-term cyclic loading have been widely studied. However, the previous researches focused on the dynamic characteristics under only one kind of cyclic loading waveform. Different kinds of exterior cyclic loading affect the natural soft clay subgrade, such as earthquakes, high buildings, high speed rails, wave loads, oil tanks, reservoirs and so on, and they demonstrate different wave patterns. Stress-controlled dynamic triaxial tests are performed under the square, triangle, sine cyclic loading, and considering the effects of cyclic numbers, dynamic amplitudes, and frequencies, the dynamic characteristics of natural soft clay are studied and analyzed, and the dynamic characteristics under different cyclic loading waveforms are compared. For comparing the stiffness degradation of soft clay under different cyclic loading waveforms, degradation index defined by cyclic shear modulus is used to analyze the stiffness degradation process.

Key words: marine deposited natural soft clay; cyclic loading waveform; stiffness degradation

0 引 言

近年来高铁、城市轨道交通、高层建筑、机场跑道、海上钻进平台、码头及油箱等工程项目都在大规模建设之中, 大部分基础设施都建立在软黏土地基上, 建成之后软土地基必定受到不同波形的循环荷载作用, 包括有地震、交通荷载等, 沿海工程项目地基还会受到波浪荷载、风荷载等。例如交通荷载对软土地基的循环作用可等效成三角形或正弦波形, 储存石油燃料等的油罐和水库液面的循环升降可等效成方形

波。由于动载作用会引起土体强度降低, 导致诸如上部结构的破坏、倾斜及滑坡等严重后果, 软土地基承受不同的外部荷载作用肯定会表现出不同的力学特性, 所以如何科学论证各类动荷载反复作用对其变形、强度和稳定性的影响? 如何有效评估其影响的工程后

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179186); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2011CDA124)
收稿日期: 2012-05-25

效性能?已成为软土工程建设的焦点问题之一。

海积结构性软土在循环荷载下的力学特性最为关心的是其累积塑性变形量与强度变化,计算土体在循环荷载下的累积变形特性模型有隐式模型和显式模型,隐式模型是通过边界面模型、套叠屈服面模型、安定性理论等建立的理论模型,而显式模型是根据试验或实测资料的基础上建立土体累积应变与其主要影响因素间的关系^[1]。显式模型中最具代表性的有 Monismith 等^[2]提出的指数模型, $\varepsilon_p = A_0 N^b$, 后有 Li 等^[3]引进了静强度参数,对指数模型进行了修改。Chai 等^[4]在 Li 改进模型的基础上又引入了初始偏应力,提出一种新的指数经验模型;Parr 等^[5]从累积应变速率的角度出发建立了伦敦黏土与循环次数的双对数关系式。蒋军^[6]研究了黏土应变速率在循环荷载下的变化规律,考虑频率、超固结比及循环应力等因素的影响;陈颖平等^[7-8]通过分析结构性黏土在循环荷载下变形与强度特性,提出了合适的动应变破坏标准;黄茂松等^[9]根据 Parr 等的研究成果,引入相对偏应力的概念,建立了塑性应变率与循环加载次数的关系;王军等^[10]考虑循环应力比、振动频率以及超固结比因素的影响,建立饱和和软黏土累积塑性应变模型。

天然黏土普遍具有结构性,其重要性早为太沙基所指出,1936 年在美国召开的第一届国际土力学与基础工程会议就受到重视。结构性黏土在外部荷载作用下表现出的结构损伤,宏观上表现出刚度软化。Idriss 等^[11]通过模量的衰减提出了软化指数的概念,并建立了软化指数与循环次数之间的表达式;此后 Yasuhara 等^[12]通过类似的方法得到了软化指数与循环次数之间的半对数关系表达式。周健等^[13]通过试验也得出软土在循环荷载下的动应力-应变关系需要考虑刚度软化的影响;王军等^[14]对每一次循环过程中饱和和软黏土的软化特性进行了研究;栾茂田等^[15]研究了初始主应力轴旋角度、初始偏应力比、初始中主应力轴系数及主应力轴旋转对软土刚度软化的影响,通过一系列试验结果,建立了刚度软化数学模型,并确定了其中的参数。

从以上国内外的研究现状中可以看出,循环荷载下的累积塑性应变与刚度软化问题都已被广泛研究,但研究的内容主要集中在一种循环荷载波形的软土特性。本文则研究海积结构性软土在 3 种不同循环荷载波形下(方形波、三角形、正弦波)的动力特性,并且分析了软土在 3 种波形下的刚度软化特性,从能量角度出发研究海积结构性软土在 3 种波形下的差异性。

1 试验试样及试验内容方法

1.1 试验试样

试验土样取自天津滨海新区临港工业区吹填场地区域,上部 2.0 m 为吹填土,下部为海积原状土,取土深度集中在 12.0 m 附近,采用薄壁取土器取样。土样液限为 54.4%,塑性指数为 26.3,主要物理参数见表 1。

表 1 海底软土主要物理参数

Table 1 Major physical parameters of marine soft clay

重度 γ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	比重 G_s	含水率 $w/\%$	孔隙比 e	灵敏度 r
18.02	2.72	39.82	1.110	3.31

1.2 压缩试验

为了比较原状土与重塑土的变形区别,测出海积结构性软土的结构屈服强度,对原状土样与重塑土样分别进行单向压缩试验。

1.3 动三轴试验方案与方法

本文主要模拟在不同循环荷载波形下海积结构性软土的动力响应,并且考虑循环振次、振动幅值及振动频率的影响,所选用的试验设备必须能自动生成不同循环荷载波形。试验设备采用美国 GCTS 公司生产的动态空心圆柱扭剪仪,该套系统加载由伺服系统自动生成,系统可自动生成方形波、三角形波及正弦波,振动次数最大可振动十万次以上,最大频率 20 Hz,满足试验要求。根据动三轴设备规定,试验试样尺寸直径为 70 mm,高度 140 mm,土样制备完后进行真空饱和,饱和度需达到 95% 以上。试验围压均为 100 kPa,试验过程不排水,具体试验方案见表 2。

表 2 不排水循环三轴试验内容

Table 2 Undrained cyclic triaxial tests

土样 编号	加载波形	振动幅 值/kPa	振动频率 /Hz
F-1	方形波 三角形波 正弦波	38	1
F-2	方形波 三角形波 正弦波	43	1
F-3	方形波 三角形波 正弦波	48	1
F-4	方形波 三角形波 正弦波	50	1
F-5	方形波 三角形波 正弦波	48	0.2
F-6	方形波 三角形波 正弦波	48	5
F-7	方形波 三角形波 正弦波	48	8

2 试验结果与分析

2.1 压缩试验结果

压缩试验结果见图 1 所示。从图 1 中可以看出,原状土 $e-p$ 曲线要高于重塑土,曲线具有明显的拐点,并分成平缓段、陡降段和趋于扰动样压缩曲线段,

体现出原状软土具有结构性, 存在一个强度屈服点; 通过 Casagrande 法确定了原状软土的结构屈服强度, 当竖向压力小于结构屈服应力时, 原状土样曲线较重塑土的平缓, 当竖向压力超过结构屈服应力时, 原状土变形突然增大, 直到最后压缩曲线与重塑土趋于一致, 具体见表 3。

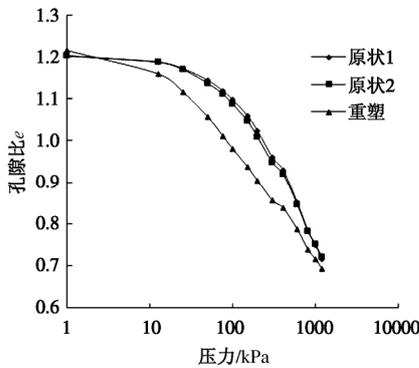


图 1 原状软土与重塑土压缩曲线对比

Fig. 1 Comparison of compression curves between natural clay and reconstituted clay

表 3 结构强度

Table 3 Structural strength

取样深度/m	上覆土重/kPa	结构屈服压力/kPa	前期固结压力/kPa	结构强度/kPa
12.0	106.0	135.0	110.0	25.0

2.2 动三轴试验结果及分析

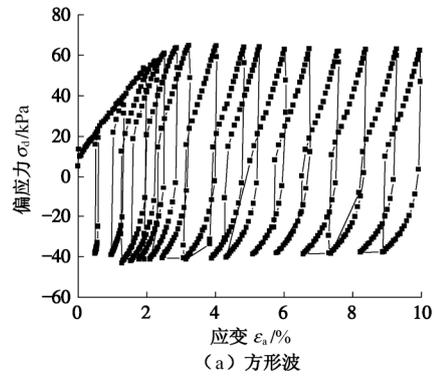
经过动三轴试验后, 可以得出软土在不同循环应力路径下的动力特性, 并且考虑了加载次数、振动幅值与振动频率的影响。

(1) 不同振动幅值下荷载波形影响

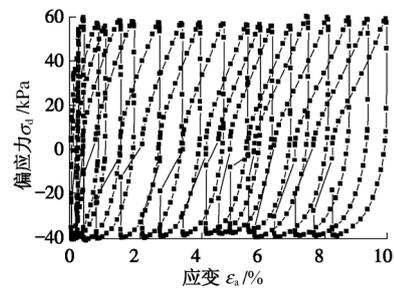
图 2 是 3 种波形下, 振动幅值在 50 kPa 下的动应力应变曲线。从滞回曲线的形状上看, 很明显与相应的加载波形相一致。在各种波形下, 振动初期应变较小时, 滞回曲线会往轴向偏转, 随着振动的进行, 滞回曲线沿轴向大体上呈现出平行移动, 累积塑性应变不断增大。

图 3 是在 3 种波形下, 分别考虑幅值 38, 43, 48, 50 kPa 下, 软土轴向应变(ϵ_a)与振动次数(N)的关系曲线 (频率 1 Hz, 围压 100 kPa)。从图中可以看出, 当循环幅值不大于 43 kPa 条件下时, 随着加载次数的增加, 在循环初期, 动应变有较大幅度的增长, 但随着循环次数的增加, 曲线渐趋平缓, 在较大的循环次数下才能发生破坏; 当循环幅值大于 48 kPa 时, 动应变在整个动载过程增长都较快, 在较少的次数下就能达到破坏。这说明软土在循环荷载下存在一个临界应力, 小于临界应力与大于临界应力表现出不同的力学特

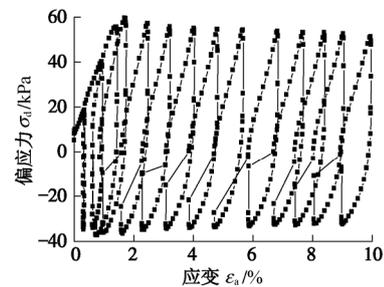
性, 这与 Sangrey 等^[16]、周建等^[13]学者研究结果一致。通过本文试验结果, 试验土样的临界应力在 43 kPa 到 48 kPa 之间。这说明软土临界应力跟软土本身的物理性质有关, 与外部荷载形式无关, 不会因为波形的不同而增大或较低临界应力大小。



(a) 方形波



(b) 三角形波



(c) 正弦波

图 2 循环三轴试验动应力应变曲线 (幅值 50 kPa, 频率 1 Hz)

Fig. 2 Dynamic stress-strain curves of cyclic triaxial tests (amplitude 50 kPa, frequency 1 Hz)

值得关注的是, 当加载幅值小于临界应力时, 3 种波形下达到振动稳定时的动应变值大小相接近, 但是当加载幅值大于临界应力时, 如图 3 (d) 所示, 3 种波形振动幅值 50 kPa, 在相同振动次数下, 方形波引起的动应变明显要大于三角形波与正弦波, 三角形波与正弦波相差不大。从能量角度解释, 幅值大于临界应力时, 方形波在相同振动次数和幅值下对软土做功要大于三角形与正弦波, 方形波下的变形必然会高于其他波形; 当动载幅值小于临界应力时, 三种波形下的变形较小, 都需要在较大振动次数下才能达到破坏, 那么不同波形对软土做的功对变形的影响很小,

所以波形对软土的影响只有在幅值大于临界应力时才能凸显出来。

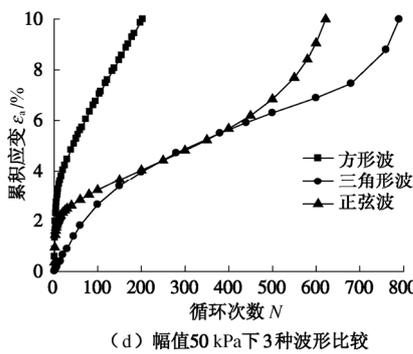
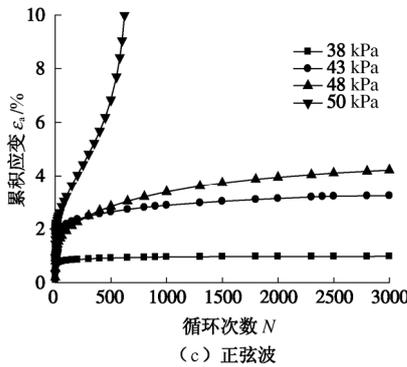
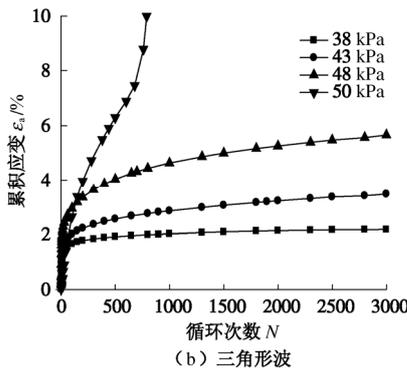
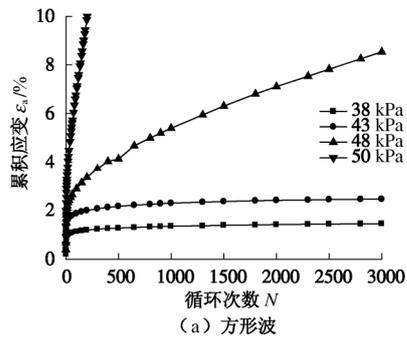


图3 不同幅值下轴向变形与振动次数的关系

Fig. 3 Relation between axial strain and dynamic number under different amplitudes

(2) 不同频率下荷载波形影响

频率对软土动力响应的影响比较复杂,周健等^[13]得出在低频下,对软土的影响不可忽略,高频下影响

较小;张茹等^[17]在总结前人的基础上得出频率对砂土的影响不大,对黏土而言,振动频率愈低,试样动变形开展愈充分,振动频率愈高,动模量和阻尼比愈大。图4为在3种荷载波形下,不同振动频率条件下加载次数(N)与轴向应变(ϵ_a)关系。为了能够明显看出频率的影响,幅值选择大于临界应力48 kPa,围压为100 kPa。

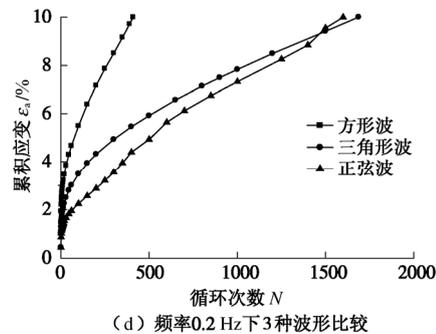
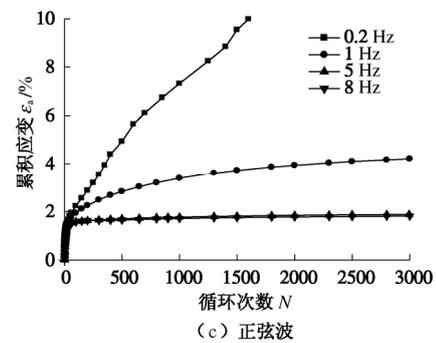
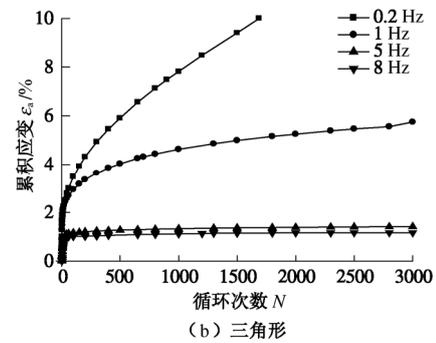
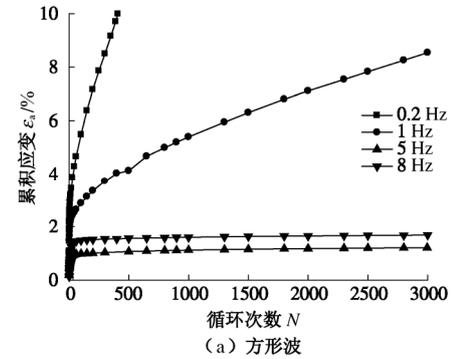


图4 不同频率下轴向变形与振动次数的关系

Fig. 4 Relation between axial strain and dynamic number under different frequencies

从图 4 的试验结果可以看出, 无论是何种波形, 在较高频下 (5 Hz 与 8 Hz), 软土随着加载次数的增加, 在循环初期, 动应变有较大幅度的增长, 但随着循环次数的增加, 曲线渐趋平缓, 3 种波形下趋于稳定的动应变值大致相同, 除方形波 5 Hz 与 8 Hz 的变形稍有差别, 但差别不大。这是由于在高频下, 荷载振动速率较高, 软土变形反应慢, 来不及充分变形, 同时不能及时完全吸收外部荷载每一次振动对其做的功, 所以软土在高频下的动应变小于低频下的动应变, 而且不同波形的影响也不明显。但在较低频率下 (1 Hz 与 0.2 Hz), 软土在循环荷载下的变形整体提高, 这是由于振动频率越低, 试样变形开展越充分越彻底, 外部荷载对软土做功越充分, 这样波形反应出的区别越明显。如图 4 (d) 所示, 在频率 0.2 Hz 下, 比较在 3 种波形下累积动应变与振次的关系曲线, 发现方形波作用下软土较早达到设置的破坏应变, 这是因为方形波对软土做功要高于三角形与正弦波对软土做的功, 故变形越大。综上可以认为软土在动载作用下也存在一个临界频率, 当高于临界频率时 3 种循环荷载波形对软土的变形影响不明显, 但低于临界频率时影响变形明显, 且相比高频下, 低频更能反映出不同波形的影响。

3 循环荷载下软土刚度软化方程

原状软土在循环荷载下, 由模量定义的刚度会发生软化, Idriss 等^[11]定义第 N 次循环下剪切模量与第一次循环剪切模量的比值为软化指数 δ , 见式 (1)。周健等^[13]研究了循环应力比、超固结比、振动频率对软化指数的影响; 王军等^[18]通过试验考虑了各向异性、超固结性、高频循环荷载作用对土体软化特性的影响并建立了能够反映土体在循环应力比过度区段软化的经验模型。

$$\delta = \frac{G_{SN}}{G_{S1}} \quad (1)$$

Idriss 等^[11]提出软化指数的概念后, 并且建立了软化指数与循环次数之间关系的指数表达式:

$$\delta_d = N^{-d} \quad (2)$$

式中, d 为软化参数。

Yasuhara 等^[12]通过类似的方法得到了软化指数与循环次数之间的半对数关系表达式:

$$\delta_d = 1 - d \lg N \quad (3)$$

式中, d 为软化参数。

通过对循环荷载作用下软土刚度弱化的分析, 根据王军等^[18], 黄茂松等^[19]的研究结果, 式 (3) 中的

参数 d 能够反映加载幅值, 振动频率, 有效固结应力, 静偏应力比、超固结比等对软土刚度软化的影响。图 5 是在 3 种波形下, 不同加载幅值下软土软化指数 (δ) 与振动次数 (N) 的关系曲线。通过分析图 5 的试验结果, 选取由 Idriss 等^[11]定义的软化指数作为研究对象, 比较在方形波、三角形波及正弦波加载下软土的刚度软化规律, 并参考 Yasuhara 等^[12]的方法, 发现土体的软化规律可以用式 (3) 表达。

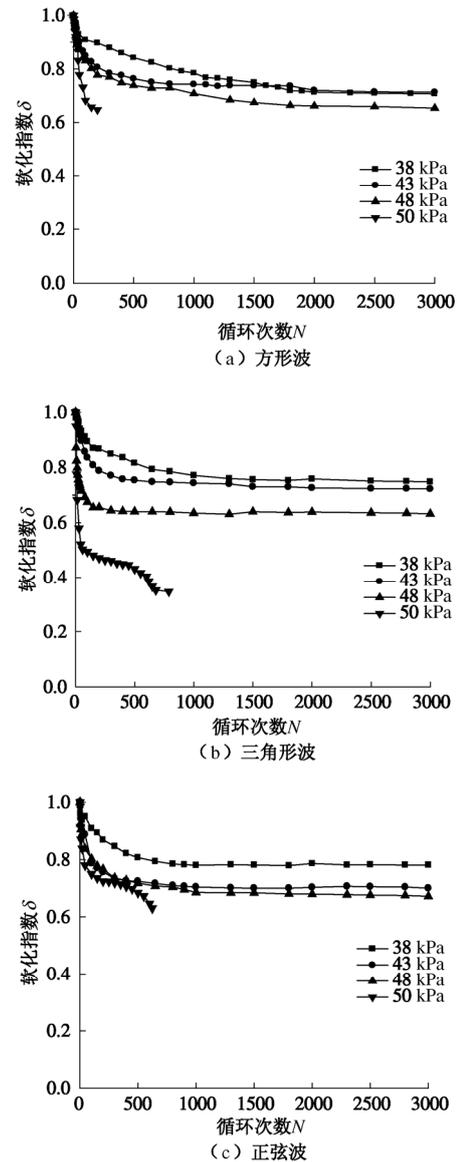


图 5 不同幅值下软化指数与循环次数关系曲线

Fig. 5 Relation between degradation index and cyclic numbers under different amplitudes

用式 (3) 表达软土的刚度软化规律后, 其中软化参数 d 值可以反映出不同循环波形与振动幅值下软土刚度软化的差异性。图 6 是软化参数 d 在不同波形和加载幅值下的变化规律, 从图中可以看出, 当幅值小于临界应力时, 3 种波形在不同幅值下 d 值变化不明

显；但当幅值大于临界应力时，每种波形下的 d 值都随着幅值的增大而迅速攀升，方形波下 d 值攀升的速度明显要快于三角形与正弦波下 d 值增大的速度。这是因为幅值在小于软土临界应力时，软土累积塑性应变较小，不同幅值下达到稳定时的累积应变值相差不大，软土刚度软化差别不大，不同循环应力路径对其影响也不够明显；当振动幅值大于软土临界应力时，不同幅值下的软土累积塑性应变增大，软土刚度软化明显增大，幅值越大刚度软化的速度越快，由于方形波在相同的振动次数下对软土做功最大，所以与正弦波和三角形波相比软化程度最高，软土刚度软化速度最快。

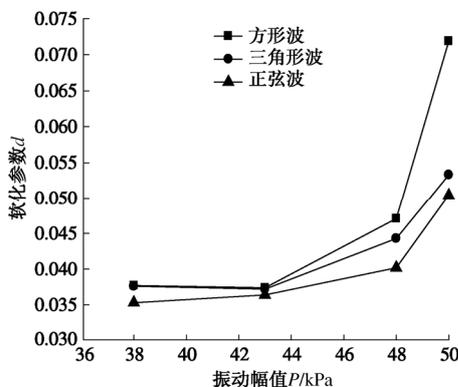


图6 软化参数 d 的变化

Fig. 6 Variation of degradation parameter d

4 结 论

为了研究原状软土在不同循环荷载波形下的力学特性，本文以天津滨海新区海积原状软土为对象，通过基本物性试验、压缩试验与动三轴试验，对比试验结果与分析，得到如下结论：

(1) 在不同循环荷载波形下，当幅值小于临界应力时，波形对软土变形的影响不大；当幅值大于临界应力时，3种波形下软土变形量增大，方形波振动下的软土变形量最大。

(2) 在不同循环荷载波形下，当振动频率大于临界频率时，不同波形对软土的变形影响不大；反之则3种波形下软土的变形量较大，且方形波对软土变形的影响最大。

(3) 循环荷载下软土的刚度软化特征表现为，当振动幅值小于临界应力时，3种波形下软化参数 d 值变化不明显；否则，方形波下软化参数 d 值大于另两种波形，且随着幅值的增大攀升的速度最快，其机制在于能量的差异性。

参考文献：

- [1] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 325–331. (HUANG Mao-song, YAO Zhao-ming. Explicit model for cumulative strain of saturated clay subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 325–331. (in Chinese))
- [2] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1975: 1–17.
- [3] LI D Q, SELIG E T. Cumulative plastic deformation for fine grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006–1013.
- [4] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907–916.
- [5] PARR G B. Some aspects of the behavior of London clay under repeated loading[D]. Nottingham: University of Nottingham, 1972.
- [6] 蒋 军. 循环荷载作用下黏土应变速率试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 528–531. (JIANG Jun. Study on the strain rate of clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 528–531. (in Chinese))
- [7] 陈颖平, 黄 博, 陈云敏. 循环荷载作用下结构性软黏土的变形和强度特性[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 1065–1071. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Deformation and strength of structural soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 1065–1071. (in Chinese))
- [8] 陈颖平, 黄 博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 764–768. (CHEN Ying-ping, HUANG Bo, CHEN Yun-min. Reliability analysis of high level backfill based on chaotic optimization[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 764–768. (in Chinese))
- [9] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软黏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. (HUANG Mao-song, LI Jin-jun, LI Xing-zhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained

- tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(7): 891 – 895. (in Chinese))
- [10] 王 军, 蔡袁强. 循环荷载作用下饱和软黏土应变累积模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(2): 331 – 338. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang. Study accumulative plastic strain model of soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(2): 331 – 338. (in Chinese))
- [11] IDRIS I M, SINGH R D, DOBRY R. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1978, **104**(12): 1427 – 1447.
- [12] YASUHARA K, HYDE A F L, TOYOTA N, et al. Cyclic stiffness of plastic silt with an initial drained shear stress[C]// Proc Geotechnique Symp on Pre-failure Deformation of Geomaterials. London: Thomas Telford Ltd, 1998: 373 – 382.
- [13] 周 建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究[J]. 土木工程学报, 2000, **33**(5): 75 – 78, 82. (ZHOU Jian, GONG Xiao-nan. Study on strain softening in saturated soft clay under cyclic loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, **33**(5): 75 – 78, 82. (in Chinese))
- [14] 王 军, 蔡袁强, 徐长节. 循环荷载作用下软黏土刚度软化特征试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2138 – 2144. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie. Experimental study on degradation of stiffness of saturated soft clay under undrained cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2138 – 2144. (in Chinese))
- [15] LUAN Mao-tian, LIU Gong-xun, WANG Zhong-tao, et al. Stiffness degradation of undisturbed saturated soft clay in the Yangtze estuary under complex stress conditions[J]. China Ocean Engineering, 2010, **24**(3): 523 – 538.
- [16] SANGREY D A, HENKEL D J, ESRING N I. The effective stress response of a saturated clay soil to repeated loading[J]. Can Geotech J, 1969, **6**: 241 – 252.
- [17] 张 茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和黏性土动力特性的影响[J]. 岩土力学, 2006, **27**(5): 699 – 704. (ZHANG Ru, TU Yang-ju, FEI Wen-ping, et al. Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5): 699 – 704. (in Chinese))
- [18] 王 军, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1713 – 1719. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang, XU Chang-jie, et al. Study on strain softening model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1713 – 1719. (in Chinese))
- [19] 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. (HUANG Mao-song, LI Shuai. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1491 – 1498. (in Chinese))