

黄河三角洲粉质土初始干密度和黏粒含量对稳态强度的影响研究

刘红军^{1, 2}, 吕文芳², 杨俊杰^{1, 2}, 王秀海^{1, 2}

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 通过固结不排水三轴试验, 对黄河三角洲粉质土稳态强度进行研究: 首先设计了3组干密度分别是1.55, 1.65, 1.75 g/cm³的粉土样, 分析了初始干密度对稳态线的影响, 论证了稳态线的唯一性; 然后又设计了5组不同黏粒含量分别是10%, 14%, 17%, 24%, 30%的粉质土, 定量分析了黄河三角洲粉质土中的黏粒含量对稳态强度线的影响, 得出了黏粒含量为17%的粉质土的稳态强度最大的结论, 并分析了产生这种现象的原因, 最终建立了稳态强度随黏粒含量变化的关系函数。

关键词: 黄河三角洲; 粉质土; 稳态强度; 液化; 干密度; 黏粒含量

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)08-1287-05

作者简介: 刘红军(1966-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋岩土工程的教学科研工作。E-mail: hongjun@ouc.edu.cn。

Influence of initial dry density and clay content on steady state strength of silty soil in Yellow River Delta

LIU Hong-jun^{1, 2}, LÜ Wen-fang², YANG Jun-jie^{1, 2}, WANG Xiu-hai^{1, 2}

(1. Key Lab of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Consolidated and undrained triaxial tests are carried out to study the steady-state strength of silty soil in the Yellow River Delta. First three groups of silty soil samples with different dry densities, i.e., 1.55, 1.65 and 1.75 g/cm³, are prepared, the influence of the initial dry density on the steady state line is studied, and uniqueness of the steady state line is discussed. Then five groups of silty soil samples with different clay contents, i.e., 10%, 14%, 17%, 24% and 30%, are prepared, and the influence of the clay content on the steady state strength line is quantitatively analyzed. A conclusion is drawn that the silty soil with the clay content of 10% has the maximal steady state strength. Reasons of such phenomena are analyzed, and eventually the correlation function between the steady state strength and the clay content is established.

Key words: Yellow River Delta; silty soil; steady state strength; liquefaction; dry density; clay content

0 前 言

黄河三角洲的土层绝大部分来自黄土高原, 由黄河搬运堆积形成, 其矿物成分以及内部结构都有别于世界上其他的河流三角洲^[1], 而且多为饱和粉质土, 土中的水多为自由水, 容易振动液化失水, 在地震等力的作用下容易发生液化和流滑破坏。

黄河三角洲有丰富的油气以及土地资源, 随着黄河三角洲社会经济建设的高速发展, 工程建设日益增多, 如城市建设、钻井平台及井场建设、公路建设等越来越多的遇到地基稳定性问题。对黄河三角洲粉质土稳态强度的研究, 将对工程建设提供合理的指导, 同时对城市抗震减灾服务, 具有深远的意义。

1975年Casagrande在他早年提出的临界孔隙比的基础上, 对Fort Peck坝部分破坏的研究后, 进一步重申了砂液化时存在“流动结构”(Flow structure)^[2], 所谓“稳态”即“流动结构”状态^[3-4]。Poulos给出了稳态变形的定义是: “土体在常体积、常有效应力、常剪切应力、常应变速率下的持续变形状态”^[5-6]。该状态下的抗剪强度称为“稳态强度”, 如图1(a)所示, 此状态下的孔隙比与有效围压的关系曲线称为稳态线。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40606020); 山东省自然科学基金项目(Y2007E07)

收稿日期: 2008-04-16

Poulos 等于 1985 年提出利用稳态强度和稳态线判断土是否发生实际液化^[6], 如图 1 (b) 所示, 在这个平面中, 稳态线是一个分界线, 线以上的区域为潜在流动液化区, 线以下的区域为无流动液化区^[7]。Poulos 还强调指出, 稳态变形是颗粒体在剪切应力作用下完全破坏了其初始结构后取得的; 通常在较大应变时, 初始结构的影响才能完全消失, 才可能产生稳态流动结构和稳态变形^[5]。因此可以认为土体的稳态线是唯一的, 不受土的结构、前期固结压力、初始密度以及排水条件等的影响。

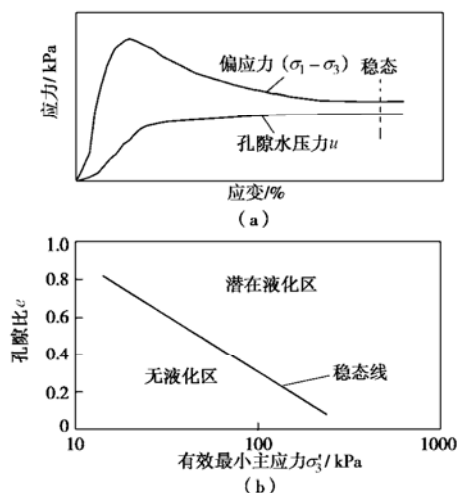


图 1 偏应力-应变关系曲线、孔隙水压力发展曲线和稳态线
Fig. 1 Deviatoric stress-strain response, pore pressure response and steady state line

前人对于稳态强度及稳态线的研究很多, 大都集中在试验条件的影响和稳态线的唯一性的讨论上^[8-9], 没有定量地考虑颗粒级配对稳态强度和液化的影响^[7]。粉质土中的细粒土尤其是黏粒对稳态强度的影响比较大^[10], 本文首先设计了 3 种不同干密度的土样, 研究初始密度对于稳态强度和稳态线的影响, 验证稳态线的唯一性; 然后又以黏粒含量为指标, 设计了几组试验, 定量分析黄河三角洲粉质土的稳态强度和稳态线随黏粒含量的变化, 建立了黄河三角洲粉质土的稳态强度模型。

1 试验土样和试验方法

本文的黏粒是指粒径 $d < 0.005$ mm 的颗粒, 黏粒含量用 C_{clay} 表示, 本文设计了 5 种不同黏粒含量的粉质土分别是 10%, 14%, 17%, 24%, 30%, 黏粒含量为 17% 的土样取自东营黄河三角洲刁口地区, 其塑性指数 I_p 为 9.2, 比重为 2.7。其他几组不同黏粒含量的粉质土则由此原状粉土和同样取自这一地区的黏土以及砂土配制而成, 具体颗粒曲线如图 2 所示。

依照黄河三角洲原状土的物理性质, 3 组不同于

密度的土样是用 $C_{\text{clay}}=17\%$ 的粉土, 分别按 ρ_d 为 1.55, 1.65, 1.75 g/cm³ 制备的; 不同黏粒含量的 5 组土样则全都按干密度为 1.65 g/cm³ 制备。

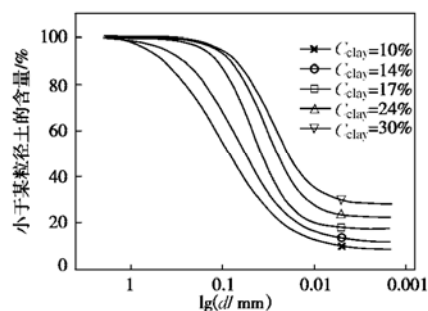


图 2 土样颗粒曲线

Fig. 2 Grain size distribution curves

重塑土样采用湿击法, 先将配好的土烘干, 粉碎, 再按成型含水率 8%, 用喷壶均匀喷水, 在塑料袋密封放置 1 d, 以便土样均匀润湿。击实筒的直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm, 分 4 层击实, 每层土质量相同, 具体数值由土样既定的干密度确定。为保持各层成型均匀, 从底层到顶层击实后各层预留高度分别为 3%, 2%, 1% 和 0%。为保持两层的紧密结合, 当土层击实后将表面刮平。

土样的饱和采用真空抽气的方法, 试样成型以后放入真空泵中抽气 1 h, 然后再缓慢注水继续抽气 1 h, 最后打开气阀在大气压下放置 24 h, 使孔隙中充满水。试样的饱和度经检测都在 97% 以上。

试验采用固结不排水三轴试验, 围压 σ_3 按照《土工试验规程》^[11] 设计为 100, 200, 300, 400 kPa, 固结至固结度达到 95%, 再持续匀速剪切直至轴向应变达到 20%。

2 试验结果

稳态强度理论, 稳态的是否发生是前提, 从试验结果来看, $\rho_d=1.65$ g/cm³ 的各黏粒含量粉质土的偏应力-应变曲线的形状都如图 3 所示, 黏粒含量为 10%、14% 和 17% 的土样, 偏应力-应变曲线有明显的峰值以及稳态, 而且试验后土样呈明显的软弱态, 为液体状; 黏粒含量为 24% 和 30% 的土样偏应力峰值不明显如图 4 所示, 在应变接近 $\varepsilon=20\%$ 时稳定, 试验后土样虽不是液体状, 但比较软弱。孔隙水压力的变化趋势都是一直增大到一个值以后便不再变化, 如图 5 所示。综上现象满足文献[2]所提出的的稳态的定义和发生的条件, 所以认为 5 组土样皆出现稳态。

另外两种 $C_{\text{clay}}=17\%$ 的不同 ρ_d 的土样, $\rho_d=1.55$ g/cm³ 的偏应力和孔隙水压力随应变的曲线的走势以及试验后土体的状态与上述的 $\rho_d=1.65$ g/cm³ 的相似;

而 $\rho_d=1.75 \text{ g/cm}^3$ 的偏应力-应变曲线一直上升, 中间没有峰值, 应变达到 20% 时偏应力很大, 例如围压为 300 kPa 时偏应力 ($\sigma_1-\sigma_3$) 可以达到 1000 kPa, 而且试验后的土样很密实。

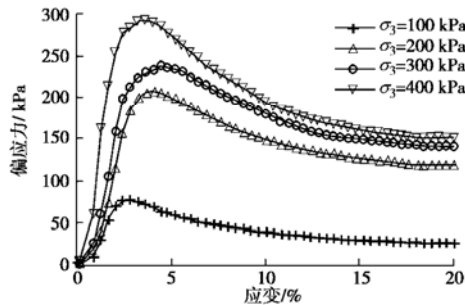


图 3 黏粒含量为 10% 土样的偏应力-应变曲线

Fig. 3 Deviatoric stress-strain response with clay content of 10%

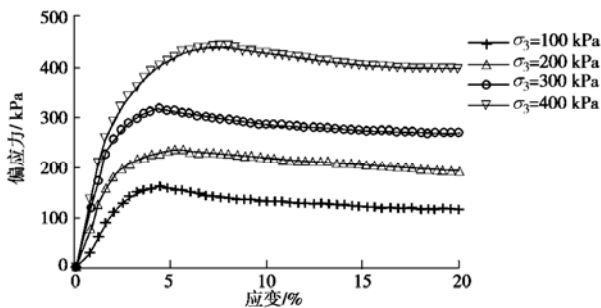


图 4 黏粒含量为 30% 土样的偏应力-应变曲线

Fig. 4 Deviatoric stress-strain response with clay content of 30%

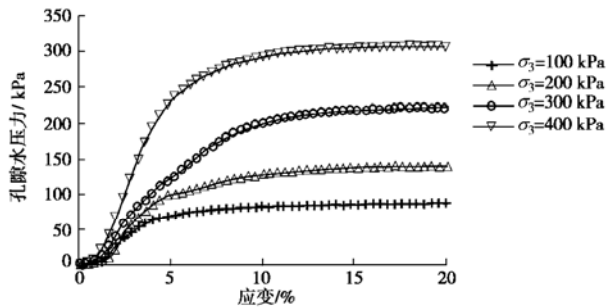


图 5 黏粒含量为 10% 土样的孔隙水压力-应变曲线

Fig. 5 Pore pressure response with clay content of 10%

本文参考一些文献剔除试验条件, 如试样体积的偏差、端部约束、鼓状变形等的影响^[12], 结合国内外的研究成果^[13-15], 取应变达到 $\varepsilon=20\%$ 时为稳态, 此时的最大剪应力 $\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 为稳态时的剪切强度。

3 初始干密度对稳态强度的影响

3 种不同初始干密度的达到稳态时的孔隙比和有效围压的关系曲线 $e-\lg \sigma'_3$, 如图 6 所示, $\rho_d=1.55 \text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_d=1.65 \text{ g/cm}^3$ 的各围压的点基本在同一条拟合线上, 对其分别单独线性拟合与总合在一起拟合的直线相差不大, 如图 6 所示。而 $\rho_d=1.75 \text{ g/cm}^3$ 的点与前两

种相差较大, 结合其偏应力-应变曲线和试验现象, 认为是由于土样密度大, 土被压硬, 无法达到稳态, 所以数据点不考虑。

综上所述可以认为黄河三角洲粉质土的稳态线和稳态强度在相同的试验条件下, 不受试样初始密度的影响, 验证了稳态线的唯一性。

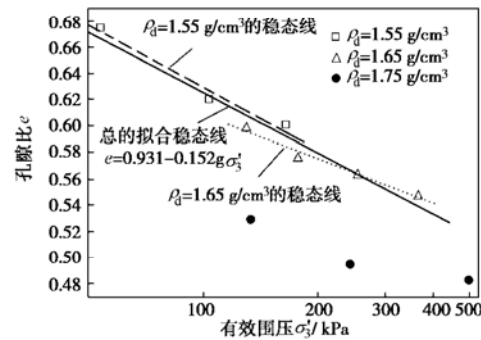


图 6 不同干密度土样的稳态线

Fig. 6 Steady state line with different dry densities

4 黏粒含量对稳态强度的影响

孔隙比和有效围压的关系曲线 $e-\lg \sigma'_3$, 如图 7 所示, 各黏粒含量的稳态线呈平行状, 其中 $C_{\text{clay}}=17\%$ 的稳态线位置最远离坐标轴, 即相同条件下的粉质土, 黏粒含量为 17% 的有最大的稳态强度。若公式 $e=k+\lambda \lg \sigma'_3$ 表示曲线函数, 则各黏粒含量的土样拟合结果如图 7 所示。

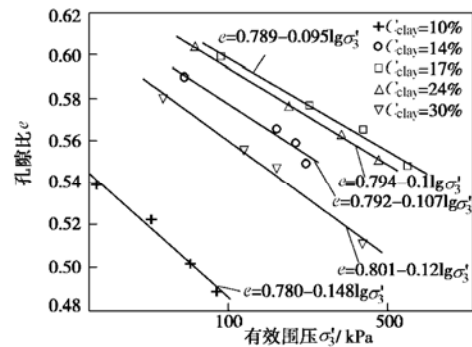


图 7 不同黏粒含量土样的稳态线

Fig. 7 Steady state line with different clay contents

为了应用方便, 本文分析孔隙比和稳态时剪切强度的关系曲线 $e-\lg \tau$, 如图 8 所示, 趋势与 $e-\lg \sigma'_3$ 相同, 同样是黏粒含量为 17% 的土样的稳态剪切强度最大, 关系曲线的参数拟合结果如图 8 所示。

分析产生这种现象的原因, 首先, 从 10%~17% 的土的稳态强度增大, 主要是由于随黏粒含量的增大, 黏粒对土的胶结作用增大; 而从 17%~30% 的稳态强度又减小, 主要原因是随黏粒含量的增加, 黏粒的强度效应逐渐增加, 非黏粒的强度效应逐渐减小, 而黏

粒的抗剪强度较低。

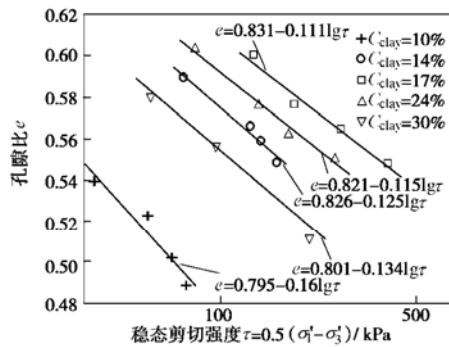


图8 不同黏粒含量土样的稳态剪切强度线

Fig. 8 Steady state shear strength line with different clay contents

通过图8中拟合得到的数据, 曲线函数表达式 $e = m + n \lg \tau$ 中的两个参数 m 和 n , 可以与黄河三角洲粉质土的黏粒含量 C_{clay} 建立相关关系曲线, 如图9、10所示。

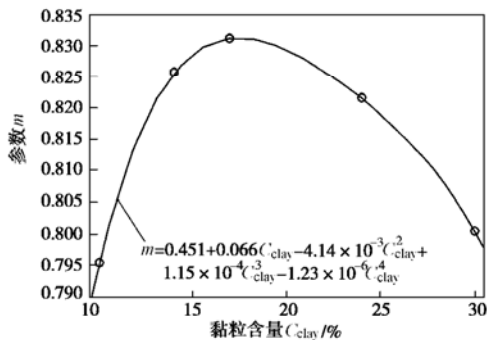


图9 参数 m 的拟合曲线

Fig. 9 Simulation curve of parameter m

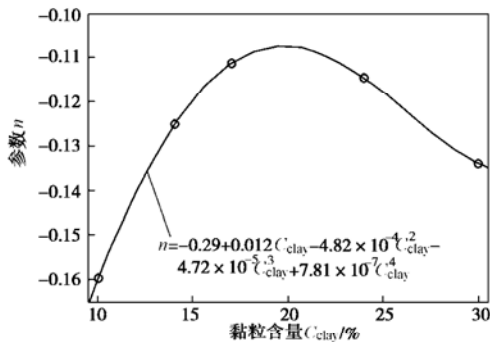


图10 参数 n 的拟合曲线

Fig. 10 Simulation curve of parameter n

用四次多项式对 m 和 n 进行了拟合, 得到参数 m 和 n 的表达式分别为

$$m = 0.451 + 0.066 C_{\text{clay}} - 4.14 \times 10^{-3} C_{\text{clay}}^2 + 1.15 \times 10^{-4} C_{\text{clay}}^3 - 1.23 \times 10^{-6} C_{\text{clay}}^4, \quad (1)$$

$$n = -0.29 + 0.012 C_{\text{clay}} - 4.82 \times 10^{-4} C_{\text{clay}}^2 - 4.72 \times 10^{-5} C_{\text{clay}}^3 + 7.81 \times 10^{-7} C_{\text{clay}}^4, \quad (2)$$

式中, $10\% \leq C_{\text{clay}} \leq 30\%$ 。这样就能根据式(2)求出

黄河三角洲地区黏粒含量在 $10\% \sim 30\%$ 的任一黏粒含量土的参数 m 和 n 的数值, 进一步可以确定该黏粒含量土质的稳态时剪切强度线,

$$e = m C_{\text{clay}} + n C_{\text{clay}} \lg \tau. \quad (3)$$

确定了黄河三角洲粉质土的稳态抗剪强度, 就可以与场地确定的由静荷载引起的驱动剪应力相比较, 判断是否具有发生实际的液化破坏的可能性, 如果静荷载产生的驱动剪应力大于稳态抗剪强度, 就会发生液化流动破坏。

5 结 论

(1) 在固结不排水三轴试验中, 当干密度较小时, $10\% \sim 30\%$ 黏粒含量的黄河三角洲粉质土在应变 20% 左右达到稳态; 干密度较大, 为 1.75 g/cm^3 时, 黏粒含量为 17% 的粉质土为应变硬化型, 无法达到稳态。

(2) 相同试验条件下, 黄河三角洲粉质土的稳态线和稳态强度不受初始干密度的影响。

(3) 相同初始干密度时, 黏粒含量从 $10\% \sim 17\%$ 的粉质土的稳态强度依次增大; 而 $17\% \sim 30\%$ 的依次减小。

(4) 黄河三角洲粉质土的稳态剪切强度线可以用式(3)表示。

参考文献:

- [1] LI Guang-xue, WEI He-long, HAN Yes-hen. Sedimentation in the Yellow River delta, part I: flow and suspended sediment structure in the upper distributary and the estuary[J]. Marine Geology, 1998, **149**: 93 - 111.
- [2] CASAGRANDE A. Liquefaction and cyclic deformation of sands-a critical review[C]// Fifth Pan-American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Argentina: Buenos Aires, 1975: 79 - 133.
- [3] 汪闻韶. 土体液化与极限平衡和破坏的区别和关系[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(1): 1 - 10. (WANG Wen-shao. Distinction and interrelation between liquefaction state of limit equilibrium and failure of soil mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [4] 汪闻韶. 土的动力强度和液化特性[M]. 北京: 中国电力出版社, 1997. (WANG Wen-shao. Soil dynamic strength and liquefaction property[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1997. (in Chinese))
- [5] POULOS S J. The steady state of deformation[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1981, **107**(5): 553 - 562.

- [6] POULOS S J, CASTRO G, FRANCE J W. Liquefaction evaluation procedure[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1985, **111**(6): 722 - 792.
- [7] 赵成刚, 尤昌龙. 饱和砂土液化与稳态强度[J]. 土木工程学报, 2001, **34**(3): 90 - 96. (ZHAO Cheng-gang, YOU Chang-long. Liquefaction and steady state[J]. China Geotechnical Engineering Journal, 2001, **34**(6): 90 - 96. (in Chinese))
- [8] RIEMER M F, SEED R B. Factors affecting apparent position of steady-state line[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(3): 281 - 288.
- [9] YAMAMURO J A, LADE P V. Steady-state concepts and static liquefaction of silty sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(9): 868 - 877.
- [10] NAEINI S A, BAZIAR M H. Effect of fines content on steady-state strength of mixed and layered samples of a sand[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, **24**: 181 - 187.
- [11] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Soil mechanics test standard[S]. 1999. (in Chinese))
- [12] 陈春霖, 张惠明. 饱和砂土三轴试验中的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 659 - 663. (CHEN Chun-lin, ZHANG Hui-ming. Some problems in triaxial test on saturated sands[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 659 - 663. (in Chinese))
- [13] 杨振茂, 赵成刚, 等. 饱和黄土的液化特性与稳态强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(22): 3853 - 3860. (YANG Zheng-mao, ZHAO Cheng-gang, et al. Liquefaction behaviors and steady state strength of saturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(22): 3853 - 3860. (in Chinese))
- [14] 魏松, 朱俊高, 王俊杰, 等. 砂土的稳态强度固结不排水三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(22): 4151 - 4157. (WEI Song, ZHU Jun-gao, WANG Jun-jie, et al. Consolidated-undrained triaxial test study on steady state strength of sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(22): 4151 - 4157. (in Chinese))
- [15] ZHANG Hui-ming, VINOD K Garga, ZENG Qiao-ling. Steady state strength of sand: concept and experiment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(2): 230 - 235.

本期广告索引

- 彩色广告 封2 北京金土木软件技术有限公司
封3 北京理正软件设计研究院有限公司
封4 武汉中科智创岩土技术有限公司