

文章编号: 1000-7598(2010)06-1797-07

黏土单层击实试验与制样因子研究

汪攀峰, 丁启朔

(南京农业大学 工学院, 南京 210031)

摘要: 使用非标准击实仪进行单层击实, 获取非标准击实状态下单层击实样的密度与击实功及含水率之间的关系, 并进一步以得到的击实样获得其抗剪强度。发现当击实功小到一定程度时, 击实密度随含水率的增大而不断增大, 两者近似线性变化, 无峰值出现。密度峰值对应的含水率与抗剪强度峰值对应的含水率有一个差值, 其值在3.4%~5.7%之间。内摩擦角随含水率增大而减小的规律仅适合于一定的击实功。内摩擦角在较小的击实功下有峰值出现, 但随着击实功的增大, 内摩擦角的变化呈线性而非曲线形式。另外, 针对土工室内模型试验的重塑土样制备问题, 结合试验数据, 给出了试验最优制样参数, 并初步提供了评价指标 η 。

关键词: 击实功; 含水率; 抗剪强度; 重塑土样

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Study of dynamic compaction of monolayer cohesive soil and factors for remolded soil

WANG Pan-feng, DING Qi-shuo

(College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: A nonstandard Proctor test was conducted on the monolayer cohesive soil to study the relationship among the density, compacting work the water content. Shear strengths of the compacted soil samples were further measured. It is shown that under lower compacting work, the compacting density increased with the increase of the water content; following a linear trend and no peak density being found in the tested range of moisture content. The moisture content for the density peak and that for the shear strength peak were separated by a gap, of which magnitude is in the range of 3.4% to 5.7% in this experiment. The rule of the reduced internal friction angle with the increased moisture content was also found to be valid for certain impacting work. Peak value appeared in the curve of the internal friction angle for lower compacting work; but the curve was replaced by linear trend when the compacting work was increased. Another focus of the experiment was on the problems of remolded soil for indoor model test. Based on the experimental data, the optimum parameters for preparing remolded soil was proposed; and an evaluating index η was given tentatively.

Key words: compaction work; moisture content; shear strength; remolded soil

1 引言

随着社会的发展, 越来越多的工程项目涉及到黏土的基础施工, 因此, 有关黏土的研究早已成为人们关注的问题。对于黏土而言, 含水率及应力历史的不同, 导致其强度等性质的变化较为明显, 因此, 对黏土施加的压力或击实功和土的含水率控制是研究黏土性质的两个重要的切入点。比如, 胡海

英等^[1]综合运用压缩试验和直剪试验探讨了黏土的含水率与压缩变形及抗剪强度的关系; 周勤等^[2]研究了压实度和含水率对黄土力学性能的影响; 而李治平等^[3]从击实功角度对黄土强度的影响进行了试验研究, 得出了黄土强度随击实功增大而增大, 且随龄期的延长而变大。目前, 对于土的击实问题的研究, 几乎采用的都是标准的普式击实方法, 然而土的性质十分复杂, 往往在不同的工况条件下表现

收稿日期: 2009-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50875131); 国家博士后基金项目(No. 20080431104, 200902521)。

第一作者简介: 汪攀峰, 男, 1985年生, 硕士研究生, 主要从事土力学及桩基础方面研究。E-mail: fengzi19852002@163.com

通讯作者: 丁启朔, 男, 1968年生, 博士后, 副教授, 主要从事土壤耕作力学研究。E-mail: qsding@njau.edu.cn

出的性质千差万别。因此,对于各类土质,尤其是黏土,仍然需要进行更系统的试验,以揭示其复杂的压实度、击实功、含水率等因素之间的变化关系。

另外,室内模型试验的重塑土样制备方法很少有报道,然而对于一个理想的模型试验,一个合适的重塑土样也是影响试验结果的重要因素之一,土质的选用、含水率的选取、击压实方法及功能的确定等都是重塑土样制备的关键,因此,一种合理的制样依据显得尤为重要。

本文设计制作了非标准的击实仪器,使用非标准击实方法,并将击实试验和直剪试验相结合,系统研究了在非标准击实状态下黏土的性质,发现了一些不同于标准击实方法的规律。同时,结合室内模型试验中重塑土样的制备问题,从试验数据出发,进行了初步的探讨,提出了制样控制指标。

2 试验研究

2.1 击实试验

本试验在自制的非标准击实仪进行,主要由底座、击样环、隔离圈、卡箍、连接螺栓、外护筒、上护筒和上盖板等组成。同时,为了击实后取样方便,在击样环与上护筒之间,加垫隔离圈,隔离圈为一弹性开口元件。击实筒结构示意图如图 1 所示。

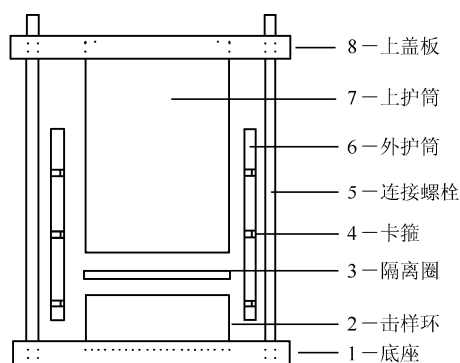


图 1 击实筒结构示意图

Fig.1 The structure of the compaction tube

试验用土为南京浦口坡地黏土。击实原理参照标准击实仪,击实次数为单层 25 次,每次击实土料质量为 300 g,保证击实后土样体积不小于铁环体积。开始 4 次沿对角线击实,此后每击一次转动 60°。制备 8 种含水率土样,间隔 2%左右,取样本烘干后经测算含水率分别为:9.69%、11.43%、13.49%、15.04%、17.42%、19.28%、21.51%、23.17%。对制备的 8 种含水率样本分别以 10、20、30、40、50 cm

的行程,以改变击实功进行击实,土样击实后沿隔离圈开口胀开并将其取下,从而留下间隙便于将击样环内的土饼切割分离,切割时用薄铁皮制作的锯沿间隙将土样锯开(含水率达到一定程度时,用吉他弦直接切开^[4]),从而能够方便,准确地测出土饼质量,再将击样环的土饼放入直剪仪内进行直剪试验。直剪试验需要施加 4 种法向压力,因此,每种含水率土样在各击实功下分别制备 4 个击实样本。

2.2 直剪试验

试验使用的直剪仪为南京土壤仪器厂的 SDJ-1 型三速电动等应变直剪仪,测力环系数为 1.923 kPa/0.01 mm。校准仪器后,将击实试验制备好的试样小心装入剪切盒,施加压力后立即进行剪切。剪切速度为 12 r/min,确保试样在 3~5 min 内剪损。各含水率土样分别进行 4 次直剪试验,施加的法向压力分别为 100、200、300、400 kPa。

3 试验结果及分析

3.1 不同击实功下最大干密度与最优含水率

击实功的大小与击实筒体积、锤重、行程、层数以及击实次数等参数有关,单位体积的击实功按下式计算^[6]:

$$E_c = \frac{W_c H N_b N_c}{V} \quad (1)$$

式中: E_c 为单位体积击实功(kJ/m^3); W_c 为锤重(N); H 为击实行程(cm); N_b 为层数; N_c 为每层击实次数; V 为击实筒体积(cm^3)。

本试验中击实筒实际为单层击样环,击样环直径为 75 mm,高度 h 为 20 mm(考虑到不同含水率土壤击实后余土高度不同,计算时取修正均值 30 mm)。计算各行程下击实功如表 1 所示。

表 1 5 种击实行程对应的击实功

Table 1 The compaction works corresponding in five different trips

行程/cm	10	20	30	40	50
单位击实功 /(kJ/m^3)	462.37	924.75	1 387.12	1 849.49	2 311.87

每次取样 300 g,分别采用 5 种行程以改变击实功对土料进行了击实,试验结果如图 2 所示。

从图可以看出,当击实功小到一定程度(10 cm 行程)时,击实密度随含水率的增大而不断增大,两者近似线性变化,无峰值出现。随着击实功的增

大,最大干密度呈增大趋势,但增长趋势逐渐放缓;最优含水率则呈下降趋势,下降趋势也越来越慢。当含水率增大到一定程度时,无论击实功大小多少,样本质量趋于一致,密度几乎没有明显变化。对于这种现象,一般认为,此时土体已经产生了流变,土颗粒之间的孔隙充满了大量自由水,击实功能很大部分都被自由水吸收,从而导致密度几乎没有变化^[6]。表2为5种行程下的最大干密度和最优含水率。从表可以看出,击实行程为40 cm与50 cm时测得的最大干密度变化很小,最优含水率也相差不多,因此,可以认为,此状态下土体已基本密实。

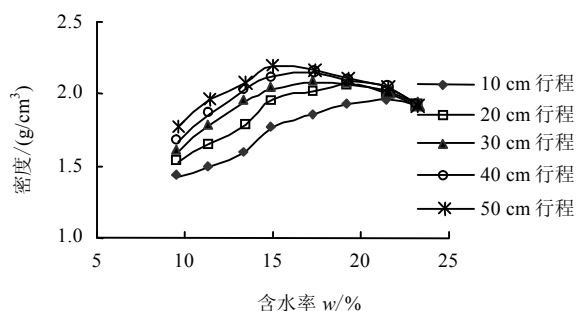


图2 不同行程下密度随含水率变化情况
Fig.2 The density changing with moisture content in different trips

表2 5种行程下土的最大干密度与最优含水率
Table 2 The largest dry density and the optimal moisture content in five different trips

行程/cm	最大干密度/(g/cm ³)	最优含水率 w/%
10	1.959	21.6
20	2.038	19.7
30	2.072	18.5
40	2.134	17.9
50	2.142	17.6

3.2 抗剪强度分析

3.2.1 击实功对抗剪强度的影响

抗剪强度指标是评价土体强度的重要参数,是指土体具有抵抗剪切破坏的最大应力。直剪试验测出测力环读数后,土抗剪强度按下式计算:

$$\tau_f = CR \quad (2)$$

式中: τ_f 为土的抗剪强度 (kPa); C 为测力环系数 (kPa/0.01mm); R 为测力环读数 (mm)。

5种击实功下各土样的抗剪强度变化见图3~7。

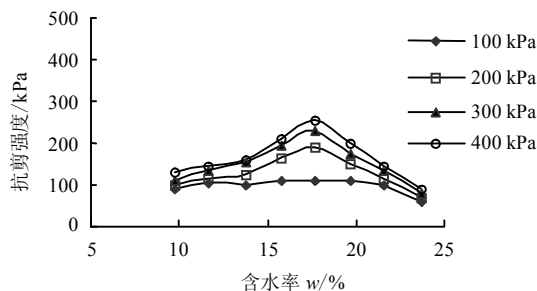


图3 10 cm行程时抗剪强度随含水率变化情况
Fig.3 The shear strength changing with moisture content in 10 cm trip

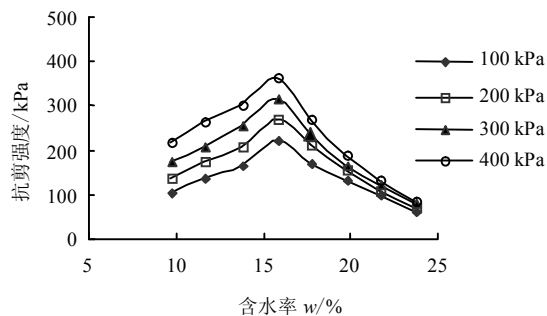


图4 20 cm行程时抗剪强度随含水率变化情况
Fig.4 The shear strength changing with moisture content in 20 cm trip

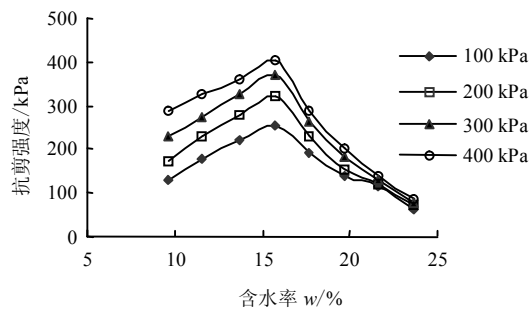


图5 30 cm行程时抗剪强度随含水率变化情况
Fig.5 The shear strength changing with moisture content in 30 cm trip

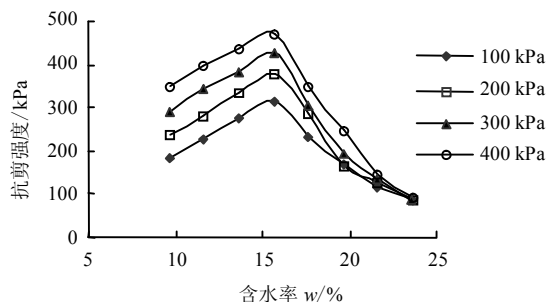


图6 40 cm行程时抗剪强度随含水率变化情况
Fig.6 The shear strength changing with moisture content in 40 cm trip

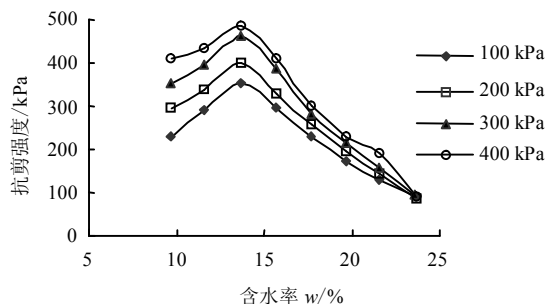


图7 50 cm 行程时抗剪强度随含水率变化情况

Fig.7 The shear strength changing with moisture content in 50 cm trip

图8与图9显示了200 kPa和400 kPa时抗剪强度随含水率在5种行程下的变化关系。

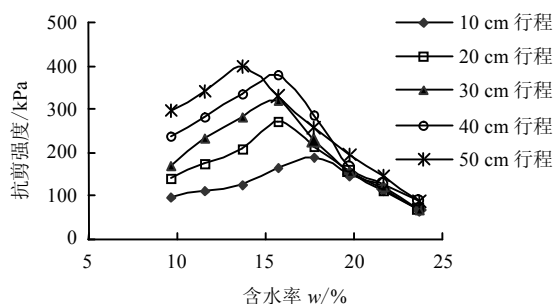


图8 200 kPa时抗剪强度在5种行程击实功下随含水率变化情况

Fig.8 The shear strength changing with moisture content in five different trips during 200 kPa

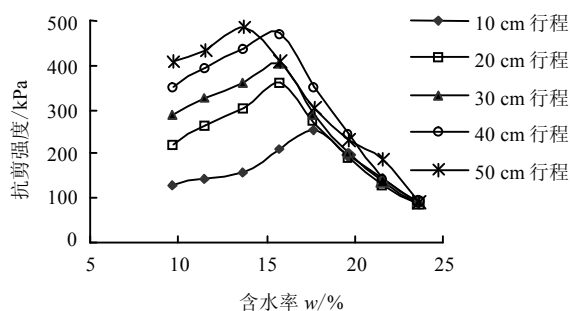


图9 400 kPa时抗剪强度在5种行程击实功下随含水率变化情况

Fig.9 The shear strength changing with moisture content in five different trips during 400 kPa

从图中可以看出,与密度指标相似,土的抗剪强度指标也会出现峰值,随着击实功的增大,抗剪强度明显增加,峰值对应的含水率减小,驼峰不断向左偏移。在击实行程从40 cm增大到50 cm时,土的密度变化很小,但强度仍在增大。分析原因,笔者认为,此时击实能量除大部分以弹性势能消耗

外,仍有小部分转化为土颗粒的势能,使得土体强度增大。

比较发现(见表3),与击实功无明显关系,密度峰值与强度峰值对应的含水率存在一个数差,这个差值范围大致为3.4%~5.7%之间。

表3 密度与强度峰值对应含水率比较

Table 3 The comparison of the peaks of moisture content between density and intensity

行程 /cm	密度峰值含水率 w / %	不同强度峰值(kPa)下含水率/%			
		100	200	300	400
10	21.6	18.0	17.8	17.5	18.2
20	19.7	15.2	14.8	14.5	14.0
30	18.5	14.4	14.1	13.7	13.5
40	17.9	14.0	13.8	13.5	13.2
50	17.6	13.0	13.0	12.7	12.5

3.2.2 土壤黏聚力与内摩擦角变化情况

黏土的抗剪强度,包括摩擦力与黏聚力两部分,内摩擦角 φ 和黏聚力 c 是表示抗剪强度大小的基本指标。图10为不同行程下黏聚力随含水率变化情况。

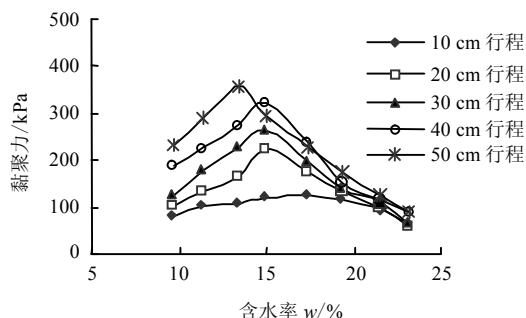


图10 不同行程下黏聚力随含水率变化情况

Fig.10 The cohesive force changing with moisture content in different trips

从图可以看出,黏聚力随含水率变化近似呈抛物线变化,且随着击实功的增大,峰值呈明显增大趋势,对应的含水率却逐渐减小。Cokcaeta在对非饱和黏土的试验中,发现了黏聚力在最优含水率附近出现峰值^[7]。对于本试验采用的非标准方法,从上图中可得到其含水率峰值按击实功从小到大的顺序分别为17.5%、15.25%、14.5%、13.85%和13.25%,与最大干密度对应的最优含水率比较,其差值分别为4.10%、4.45%、4.00%、4.05%和3.65%。上述差值基本在4%左右,说明了在本试验采用的非标准方法中,黏聚力峰值并不在最优含水率附近出现,而是有一定的距离。可见,标准的不同对于土壤的性质有着显著影响。

各行程下内摩擦角随含水率变化情况见图11。

内摩擦角随着击实功的增大越来越趋于线性变化。当行程（击实功）较小时，内摩擦角随含水率变化而出现峰值，但随着行程（击实功）的增大，峰值渐不明显，击实行程达到 50 cm 时，近似线性变化，内摩擦角随含水率增大而减小。

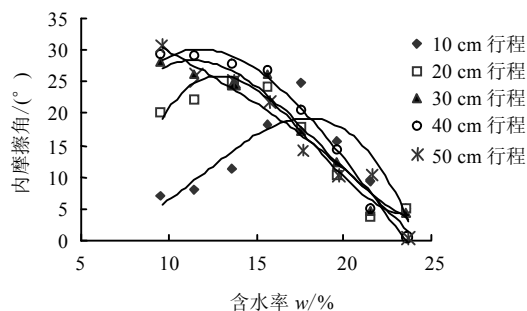


图 11 不同行程下内摩擦角随含水率变化情况

Fig.11 The internal friction angle changing with moisture content in different trips

有学者对压实含水率和内摩擦角的关系也进行了研究，发现内摩擦角随含水率增加而减小^[7]。从图 11 可以看出，图中曲线的总体趋势符合这种规律。但在击实功较小情况下，却有峰值出现，即此时也对应了一个峰值含水率，随着击实功的增大，线性变化慢慢取代了这种曲线变化。因此，对于内摩擦角随含水率增大而减小这个结论，笔者认为，只适合于一定的击实功情况，对于不同击实功状态下，两者之间的相互关系是有变化的。

4 室内重塑土样制作参数探讨

在进行桩基试验等需要重塑土样的室内模型试验时，对于重塑土样的制备很少有与之相关的报道。对于室内重塑土样，由于一般要对模型进行垂直、水平和扭转加载，所以要满足 3 个方面的要求，即加垂直荷载时，土应具有一定的承载力，使模型的沉降不宜过大，但也不能太小；加水平荷载时，土不应过早开裂，但也不能使模型的位移太小；加扭转荷载时，不能由于土的抗扭阻力太小，使模型在土中自由转动，但也不能使模型转角太小而不能测读^[8]。考虑到这些条件，选取何种类型的土是第一步，这在相关模型试验中经常被讨论；然而，对选取的土如何进行制样，则几乎未能引起足够的重视。

在以往的室内模型试验研究中，制样问题往往被一带而过，很多都是采用分层填实至一定密度为止^[8-9]，也有学者通过在原状土中加入掺加料，再经过室内土工试验制取重塑土样^[10]。制备室内重塑土样，其目的是尽可能地模拟原状土样，在室内条

件下分析土的性质以及进行各种模型试验。其中，最普遍的控制指标是土样的密度与含水率。然而，一定的密度到底如何确定？制样时选取多少含水率的土样？击（碾）实的功能如何确定？这些因素在以往的研究中都未提到。事实上，缺少明确标准的制样过程不仅难以控制，且不同试验人员操作的结果往往是不一样的，这就会对试验结果造成影响。

通过本试验，结合考虑室内重塑土样要满足的三方面要求，笔者认为，对于室内重塑土样以及工程实际中的地基，并不是压得越实（即密度越高）、强度越大（即抗剪强度越大）越好，两者都能满足试验要求时重塑土样就是最理想的。在本试验中，40 cm 行程击实功时土体已基本密实，强度也满足要求，因此，将 40 cm 行程时的击实功定为最佳击实功。由此提出了这样的设想，即在确定使用何种土之后先进行室内小型制样试验（如本试验），在获得密度、强度参数后将两个指标综合考虑，得出一个最佳状态，以此状态下的参数为依据，再进行模型试验用的重塑土样制备。鉴于以上分析，本试验确定 40 cm 行程×25 次冲击为最佳击实功，最佳击实参数如表 4 所示。

表 4 本试验黏土的小型制样最佳击实参数

Table 4 The optimal compaction parameters of the clay in this experiment

单位击实功 /(kJ/m ³)	击实环体积 /cm ³	最优含水率 w/%	密度 /(g/cm ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
1 849.49	88.312 5	17.9	2.134	215.5	19.5

在进行击（压）实试验时，击实功能一方面排除土体中气体，使土体变得密实，这体现在密度增大；另一方面，使土的强度增加，主要反映于抗剪强度的增大。为此，作出这样的设想：在松散状态下，假定土的密度极小，可看作近似为 0，故可假想土颗粒间应力相对于击实后土体的自重应力很小，可忽略不计，而且认为此时土体没有强度。这样，击实的功能转化为两部分，一部分是土体的自重应力，另一部分为土的抗剪强度。因此，针对本试验用黏土进行重塑土样制备时，提出了无量纲制样因子 η ：

$$\eta = \frac{\kappa(\sigma + q_u)}{Q} \quad (3)$$

式中： σ 为土的自重应力 (kPa)； q_u 为土的极限压应力 (kPa)； κ 为修正系数，其值取 1.67，本试验中，将 40 cm 行程击实作为最佳击实状态，为方便

比较,将制样因子 η 定为整数1.0,此值由此反算得来; Q 为单位击压力(kPa),即击锤每次击实时对土体的冲击应力,其值可由单位击实功 W 得

$$Q = WV / (Sh) \quad (4)$$

式中: V 、 S 、 h 分别为击样环体积(修正值)、击实样横切面积和高度。可见, Q 与 W 在数值上是相等的。

在此认为土样在击实后是均质的,因此取 σ 为

$$\sigma = \gamma b \quad (5)$$

式中: γ 为土的重度, $\gamma = \rho g$; b 为土层厚度,本文取30 cm。

由于黏性土的破坏过程由其黏-弹-塑性性质及抗剪强度的性质决定^[11],土体的破坏就是它的内部剪应力达到了抗剪强度^[12],故这里引入土的极限压应力作为其强度评价指标。在本试验中重塑土样的制备符合普朗特课题中基本假设,故 q_u 的计算参考下式^[13]:

$$q_u = c \cot \varphi \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) e^{\pi \tan \varphi - 1} \quad (6)$$

式中: c 为黏聚力(kPa); φ 为内摩擦角($^\circ$)。

从表5可看出,在最佳击实状态下,即击实行程为40 cm时, $\eta=1.00$,因此,也将此值作为标准值。当 η 在此值附近时,即认为土体制样良好,满足试验条件。

表5 各击实行程下的制样因子 η

Table 5 The factor η in different compaction trips

行程/cm	10	20	30	40	50
η	1.77	1.30	1.09	1.00	0.87

土壤是一种非常复杂的物质,其力学性质尤其难以明确。对于不同的试验方法、不同的土质,所得到的试验结果往往千差万别,在进行室内模型试验重塑土样的制备时也是如此,这里引入制样因子 η 旨在对室内重塑土样制备问题进行初步的探讨,至于是否合理有待于深入研究。

5 结 论

通过本试验,反映了在非标准击实状态下黏土的一些性质与表现,与标准击实法相比,有一些特殊的规律:

(1) 当击实功小到一定程度时,击实密度随含水率的增大而不断增大,两者近似线性变化,无峰

值出现。

(2) 密度峰值与强度峰值对应的含水率存在一个数差,对于本试验用土,这个差值范围大致为3.4%~5.7%之间。击实功改变对两者无明显影响。

(3) 对于本试验用土,黏聚力对应的含水率峰值按击实功从小到大的顺序分别为17.5%、15.25%、14.5%、13.85%和13.25%,与最大干密度对应的最优含水率比较,其差值分别为4.10%、4.45%、4.00%、4.05%和3.65%。

(4) 内摩擦角随含水率增大而减小这个结论,只适合于一定的击实功情况下,对于不同击实功状态下,两者之间的相互关系是有变化的。当击实功较小时,内摩擦角随含水率变化出现峰值,但随着击实功的增大,峰值渐不明显;当击实功较大时,近似线性变化,内摩擦角随含水率增大而减小。

此外,进行室内模型试验的重塑土样制备时,建议先做小型制样试验,在获得基本参数后,得出一个最佳状态,以此状态下的参数为依据,引入制样因子 η ,再进行模型试验用的重塑土样制备。制样因子的合理性仍要进行深入探讨,室内模型试验的重塑土样制备也值得做进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 胡海英,王钊.含水量对压实黏土的变形及强度性能的影响[J].公路,2007,(2):1-6.
HU Hai-ying, WANG Zhao. Effects of moisture content on compression deformation and shear strength of compacted clay[J]. Highway, 2007, (2): 1-6.
- [2] 周勤,赵发章,张洪亮.压实度和含水量对于压实黄土力学特性的影响[J].公路,2006,(1):67-70.
ZHOU Qin, ZHAO Fa-zhang, ZHANG Shi-liang. Influence of compactness and water content on mechanical properties of compacted loess[J]. Highway, 2006, (1): 67-70.
- [3] 李治平,王绍兵.击实功对黄土强度影响的试验研究[J].交通科技,2001,189(6):19-20.
LI Zhi-ping, WANG Shao-bing. Study on experiment of ramming work influence on the strength of yellow soil[J]. Transportation Science & Technology, 2001, 189(6): 19-20.
- [4] FROST J D, PARK J Y. A critical assessment of the moist-tamping technique[J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(1): 57-70.

- [5] 王志坚, 叶阳升, 王仲锦. 击实试验标准不同对试验结果的影响[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(2): 53—57.
WANG Zhi-jian, YE Yang-sheng, WANG Zhong-jin. The effects of different hitting test standards on test results[J]. **China Railway Science**, 2003, 24(2): 53—57.
- [6] 张志权, 王志勇. 最大干密度和最优含水率的准确性探讨[J]. 长安大学学报(建筑与环境科学版), 2004, 21(2): 7—10.
ZHANG Zhi-quan, WANG Zhi-yong. Discussion on precision of biggest dry density and optimum water content[J]. **Journal of Chang'an University (Architecture and Environment Science Edition)**, 2004, 21(2): 7—10.
- [7] BRAJAM DAS. Principles of geotechnical engineering[M]. Southwick: Thomson Engineering, 2001.
- [8] 林亚超, 王邦楣. 砂性土中单桩和桩基的模型试验[J]. 桥梁建设, 1997, (2): 58—70.
- [9] 王晶颖, 梁仁旺. 砂性土中桩基模型试验研究[J]. 山西建筑, 2006, 32(7): 105—106.
WANG Jing-ying, LIANG Ren-wang. Experimental investigation of pile foundation model in sand soil[J]. **Shanxi Architecture**, 2006, 32(7): 105—106.
- [10] 刘恩龙, 沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 679—683.
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 679—683.
- [11] 王伟, 冯小平, 邹昀, 等. 黏性土力学强度与微结构动态环境能场内关联分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2219—2224.
WANG Wei, FENG Xiao-ping, ZOU Jun, et al. Analysis of intrinsic correlation of mechanical strength with microstructure dynamic environmental energy field of clayey soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2219—2224.
- [12] 万玉珍, 林德明. 重塑黄土的应力-应变关系[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 106—110.
- [13] 卢廷浩, 刘祖德, 等. 高等土力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.