

文章编号 0559-9350(2015)09-1103-07

无黏性混合土临界细粒含量的多途径判别研究

朱建群^{1,2}, 孔令伟³, 高文华², 李雄威¹

(1. 常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213002;

2. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

3. 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)

摘要: 临界细粒含量反映了无黏性混合土颗粒级配和结构性对力学性状的重要影响, 其值的确定是一个相互验证的过程。假设无黏性混合土具有砂-粉二元结构, 在此基础上通过理论分析颗粒骨架于孔隙比的影响, 运用土体基本物理指标对临界细粒含量的范围进行了预测; 最大孔隙比和最小孔隙比随着细粒含量的变化反映了颗粒的形状和相互间接触关系, 由此得到的临界细粒含量也是区间值; 分形理论中的分维数反映了土体颗粒结构的自相似性, 通过分形维数变化情况的探讨进一步缩小了临界细粒含量的取值; 稳态线反映出无黏性混合土的力学性质特征, 取稳态线斜率变化处的细粒含量为临界细粒含量。后两种方法得到的临界细粒含量均在前两种方法获得的区间范围内。综合各种方法, 得出由南京砂重塑得到的无黏性混合土的临界细粒含量为25%。

关键词: 临界细粒含量; 二元结构; 孔隙比; 分形维数; 稳态线

中图分类号: TU411

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20141409

1 研究背景

无黏性混合土在地表广有分布, 由于其表现出与纯净砂土不同的应力-应变关系和强度特性, 尤其是低围压下无黏性混合土(如粉砂)表现出应变软化的应力-应变关系^[1-3], 从而导致了无黏性混合土的渐进性破坏, 这使得众多学者对细粒(这里指粒径小于0.075 mm的颗粒)含量于无黏性混合土的作用进行了重新思考和研究, 有必要探究结构性和颗粒级配对土体应力-应变关系和强度特征的影响^[4-5]。

土体的结构性反映了土粒或粒团在空间的排列和相互联结形式, 颗粒级配则是反映了土体骨架大小和组成矿物情况, 它们共同对土的物理力学性质起决定作用。Thevanayagam等^[6-7]的研究表明: 相同试验条件下纯砂、粉砂与砂质粉土的强度特征与变形特性均有较大差异, 依据细粒含量对应力-应变关系的影响, 可将无黏性混合土划分为两类, 一类为较大颗粒的砂粒控制的土体, 另一类为较小颗粒的细粒控制的土体, 相应地可定义为粉砂和砂质粉土。由此, 将粉砂过渡到砂质粉土的细粒含量定义为临界细粒含量(transitional fines content)或细粒含量门槛值(threshold fines content)。Lade^[8]在总结无黏性土最大孔隙比和最小孔隙比受试验方法影响的同时, 探讨了细粒含量对于最大、最小孔隙比的影响作用。Yang^[9-10]在对黄河堤北海区沉积物液化特征研究的基础上曾对临界细粒含量进行了探讨, 但试验中土样的土骨架和细粒并不是来自于同一地区。细粒含量的研究将有助于从土体微观结构上正确把握无黏性土的强度特性, 但目前对临界细粒含量的研究成果并不多见。

收稿日期: 2014-11-22; 网络出版日期: 2015-06-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20150618.1344.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41302226); 湖南省自然科学基金项目(10JJ1036); 江苏省自然科学基金项目(BK20131141)

作者简介: 朱建群(1975-), 女, 江西上饶人, 教授, 博士, 主要从事特殊土土力学研究。E-mail: zhu-jq@163.com

受土体结构性和颗粒形状的影响,具备不同土骨架和细粒的无黏性土的临界细粒含量会有所不同,且其值的确定应是一个从区间值到某定值的过程。本文以南京砂为粗粒,以其间筛选出的细粒为充填颗粒,配成不同细粒含量的无黏性混合土,运用物理指标基本定义、孔隙比变化、分形理论和稳态理论等方法对细粒含量临界值进行了研究,这对于正确认识临界细粒含量,完善无黏性混合土的强度和稳定性相关理论具有一定的理论意义和现实价值。

2 基本物理指标法

无黏性混合土最大孔隙比与最小孔隙比取决于其颗粒级配。借鉴Lade分析土体最大、最小孔隙比的方法,通过三相指标的换算可计算出孔隙比所对应的细粒含量。当仅考虑较大颗粒的砂粒和较小颗粒的细粒构成无黏性混合土,若颗粒为圆形时则土体为二元结构,孔隙比随细粒含量的变化如图1所示。由图可知,当细粒含量很低时细粒仅充填于砂粒所形成的孔隙中,此时土体的体积可不发生变化,质量却是变化的。而当细粒含量很高时,细粒将砂粒完全隔离,对应的孔隙比即为细粒间的孔隙比。总体上,随着细粒含量增加,土体的孔隙比不断减小,直至达到最小值,而后开始增大。

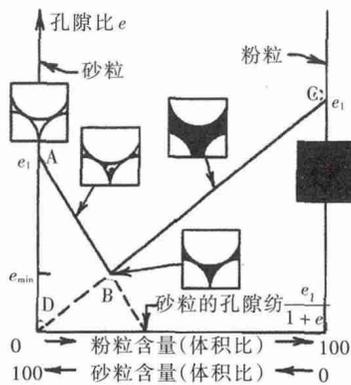


图1 孔隙比随细粒含量的变化

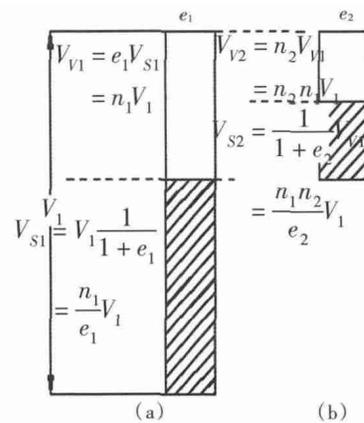


图2 颗粒与孔隙间的体积关系

如图2(a),当土体中不存在细粒时,即 $FC=0$ (FC为 fines content 缩写),按照三相比例指标定义,各项体积分别为:

$$V_{v1} = e_1 V_{s1} = n_1 V_1 \quad (1)$$

$$V_{s1} = \frac{V_{v1}}{e_1} = \frac{1}{1+e_1} V_1 = \frac{n_1}{e_1} V_1 \quad (2)$$

式中: V_{s1} 为骨架颗粒(砂粒)体积; V_{v1} 为孔隙体积; V_1 为土体总体积; e_1 为砂粒的孔隙比; n_1 为与 e_1 相对应的孔隙率。

当细粒含量很低,其充填于砂粒孔隙中,如图2(b)。由于土体为二元相,则对应的孔隙体积和细粒体积分别为:

$$V_{v2} = e_2 V_{s2} = n_2 V_{v1} = n_2 n_1 V_1 \quad (3)$$

$$V_{s2} = \frac{1}{1+e_2} V_{v1} = \frac{n_2}{e_2} n_1 V_1 \quad (4)$$

式中: V_{v2} 为充填了细粒之后孔隙的体积; V_{s2} 为细粒所占据的体积; e_2 即为当 $FC \neq 0$ 时细粒的孔隙比, n_2 为与 e_2 对应的孔隙率。在此情况下,土体的总孔隙比为:

$$e_{tot} = \frac{V_{v2}}{V_{s1} + V_{s2}} = \frac{n_1 n_2 V_1}{\frac{n_2}{e_2} n_1 V_1 + \frac{n_1}{e_1} V_1} = \frac{n_1 n_2}{\frac{n_1}{e_1} + \frac{n_2}{e_2} n_1} \quad (5)$$

考虑到细粒和砂粒具有不同的土粒比重,分别为 G_{sand} 和 G_{silt} ,则对应的细粒含量为:

$$FC = \frac{m_{silt}}{m_{sand} + m_{silt}} = \frac{G_{silt} \cdot V_{S2}}{G_{sand} \cdot V_{S1} + G_{silt} \cdot V_{S2}} = \frac{G_{silt} \cdot n_1 n_2 V_1 / e_2}{G_{sand} \cdot n_1 V_1 / e_1 + G_{silt} \cdot n_1 n_2 V_1 / e_2} = \frac{G_{silt}}{\frac{G_{sand}(1+e_2)}{e_1} + G_{silt}} \quad (6)$$

由于砂粒和细粒均存在孔隙比的最大值和最小值，存在交叉现象；另一方面，颗粒不可能全为规则的圆形，存在孔隙比出现偏离的现象，由此得到的临界含量应为一区间值。

按《土工试验规程》(SL237-1999)确定南京砂砂粒和细粒的土粒比重分别为 $G_{sand}=2.709$ ， $G_{silt}=2.79$ ，以及最大孔隙比和最小孔隙比分别为： $e_{1max}=1.128$ ， $e_{1min}=0.769$ ， $e_{2max}=2.37$ ， $e_{2min}=0.856$ ，将它们代入式(2)，取两端极值得到 FC_{th} 区间值为 19%~38%，见表 1。

表 1 无黏性混合土极值孔隙比得到的 FC_{th}

	e_{1max}	e_{1min}
e_{2max}	26%	19%
e_{2min}	38%	30%

3 孔隙比法

将取自南京河西地区的南京粉细砂进行分选得到砂粒和细粒，砂粒粒径范围为：0.075~0.25 mm，细粒为通过 0.075 mm 筛网的颗粒，由砂粒与细粒按照不同质量比例重新配置成试验重塑样。按照前面取得的临界细粒含量可能存在范围，掺入的细粒含量分别为 0%，3%，6%，9%，12%，15%，25%，35%，45% 和 60% (均为质量百分比，同时为表述方便，以 FC0，FC3，FC6，FC9，FC12，FC15，FC25，FC35，FC45 和 FC60 表示各细粒含量试样)。为进行对比，同时将细粒的级配曲线和最大、最小孔隙比示于图 3 和图 4 中。

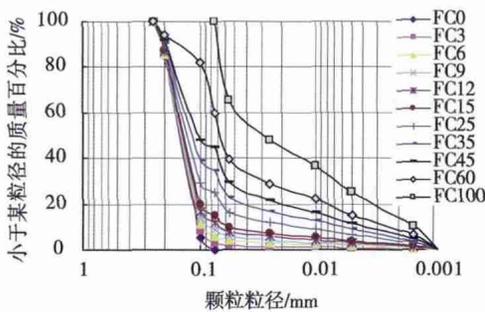


图 3 无黏性混合土的颗粒级配曲线

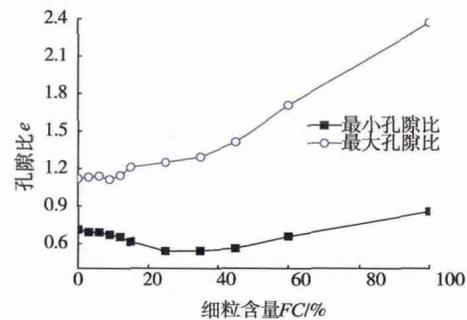


图 4 最大孔隙比和最小孔隙比随细粒含量的变化曲线

由图 4 可见，在细粒含量很低时，无黏性混合土的最大孔隙比随细粒含量产生的变化非常微小，在细粒含量超过 20% 后才呈明显的上升趋势，而最小孔隙比的变化存在较明显的转折点。图中显示该点对应的细粒含量为 25%，即当 $FC < 25\%$ 时，最小孔隙比随细粒含量增加而减小，而后才随着细粒含量增加而增大。这可以理解为：混合土中的细粒从无到有逐渐增加的过程中，细粒须首先占据的是砂粒间的孔隙，孔隙比减小，在砂粒孔隙全被占据后，其被细粒分离成各自独立而无相互接触作用。最大孔隙比形成过程中可不需细粒充填砂粒的孔隙，尤其在细粒含量极低的情况下，细粒对最大孔隙比无太大影响，其主要依靠骨架颗粒相互接触形式决定了最大孔隙比；而最小孔隙比则由于细粒的填充作用，取决于细粒与骨架颗粒的相互接触作用。最大孔隙比和最小孔隙比的这种变化规律，也恰恰说明了细粒处于孔隙间且两种颗粒相互作用时，土体孔隙比变化范围增大，对无黏性混合土力学性质的影响最大。而当细粒作为土骨架时，孔隙比对土体力学性质影响会减弱，细粒间表面张力等作用更为显著。

Yang 对由 Hokksund 砂和黄河埝北细粒重塑而成的无黏性混合土样的试验结果为最大孔隙比与最小孔隙比随细粒含量的变化规律是一致的，均存在相同的转折点。而在本研究中，南京砂与其他无

黏性土具有不同的矿物成分和颗粒形状，南京砂是以片状云母为主，而Hokksund砂则是以颗粒状石英为主，矿物成分和形状也是影响孔隙比的重要因素之一。基于此，将临界细粒含量确定为25%还有待进一步验证。将物理指标法确定的细粒含量区间值与孔隙比随细粒含量变化确定的相对比，细粒含量范围缩小，体现了颗粒之间的相互接触关系，因此这里取临界细粒含量的范围为20%~35%。

4 分形特征法

混凝土中细粒含量的变化决定了其结构特性，也进一步决定了其力学性质和工程特性。土粒作为土体骨架，是土体结构的基本单元，但其没有特征长度，而具有自相似的几何体。用粒径的重量分布表征土体的分形特征，是土体分形分析的重要手段之一，具有精确简便的优点^[11]。因此，可借鉴分形理论对临界细粒含量进行判别分析。

根据分形理论的运用，小于粒径 d 的土粒百分含量 $P(d)$ 与粒径 d 的关系为：

$$P(d) \sim d^{3-D} \quad (7)$$

式中， D 为土粒分布的分维。

从拓扑学角度来讲，分维反映的是空间点位置描述时所需的独立坐标数目，而分形理论则将分维概念扩展，认为其变化是连续的不必是整数可以是分数。一般来说，土体的级配越好，分选性越差，相应的粒度分维值就越大。对于土体这类颗粒型材料而言，其 D 值介于2.0~3.0之间^[12]。

通过对式(7)取对数，则 $(3-D)$ 是双对数坐标系下 $\lg(d)$ 和 $\lg(P(d))$ 的直线斜率。通过直线拟合求得直线斜率，进而求得维数 D 。由此可见，可根据土的累积曲线确定土粒粒径分布的分维。

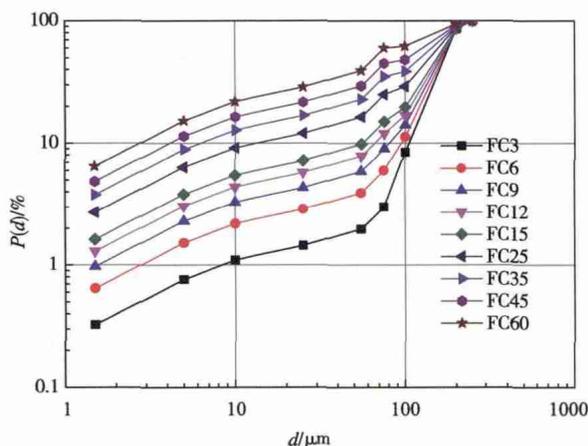


图5 无黏性混合土的级配对数曲线

表2 无黏性混合土的粒径分维特征

细粒含量	3%	6%	9%	12%	15%	25%	35%	45%	60%
分维值	1.9648	2.0944	2.1675	2.2181	2.2567	2.3429	2.3982	2.4388	2.4845
相关系数	0.7923	0.8266	0.8522	0.8732	0.891	0.9351	0.9629	0.9789	0.9866

图5为各无黏性混合土的双对数形式累积级配曲线，与式(7)所表达的意义相同。通过双对数坐标下直线拟合得到各无黏性混合土的分维值，列于表2，由此可见，随着细粒含量的增加，分维值在不断增大，颗粒级配由不良向良好过渡。但从图表中也可看出，对于细粒含量小于25%的土体如采用单一的 D 值则不能很好反映土颗粒几何状态和分形结构，且通过直线拟合得到的斜率值，其相关系数均低于93%，在一定程度上不满足相关性的要求。这说明FC25以下的曲线仅通过一个分维数来反映土体颗粒的情况，是不恰当的。因此，根据图5中曲线的特征，当细粒含量低于25%时，土体存在2个分维，即存在具有两个无标度区间(0.25~0.055)mm和(0.055~0.005)mm，说明累计曲线较

为陡峭或存在突变平台，多为级配不良土；而FC25及以上土体存在一个分维，仅有一个无标度区间即为(0.25 ~ 0.005)mm，累积曲线平缓连续无突变平台，对应的是级配良好土。

由此可见，根据土颗粒分形结构是否为多重分布的特征，可考虑取临界细粒含量为25%。

5 稳态线分析法

无黏性混合土材料的抗液化性能是岩土工程师极为关注的问题^[13]。Poulos和Castro^[14]等人提出的基于稳态线的液化评估方法回答了无黏性土体流滑失稳的原因，为许多学者关注和熟知。任何颗粒状材料的稳态变形是指在常体积、常有效应力、常剪切应力、常速度的一种连续变形状态。土体在稳态时的广义剪应力 $q_{ss}((\sigma'_1 - \sigma'_3)_{ss})$ 或有效平均主应力 $p'_{ss}(((\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3)_{ss})$ 与该状态下孔隙比 e 之间的关系曲线，即为稳态线，其表达式见式(10)。当土体应力状态落在稳态线之上，则具有潜在流动液化趋势；当土体应力状态落在稳态线以下，则不具备该可能性。已有研究成果^[5,15]表明无黏性混合土的颗粒级配对稳态线是存在影响的。

为了对临界细粒含量进行深入探讨，通过配制不同孔隙比的无黏性混合土进行三轴不排水剪切试验，获得各试样稳态时有效平均主应力，并绘制稳态线，如图6所示。

这里将稳态线表述在 $e - \log p'_{ss}$ 空间内。其表达式为：

$$e = \lambda - \kappa \log p'_{ss} \quad (10)$$

式中， λ ， κ 为待定参数。以南京砂为土体骨架构成的不同细粒含量的无黏性混合土拟合参数如表3。

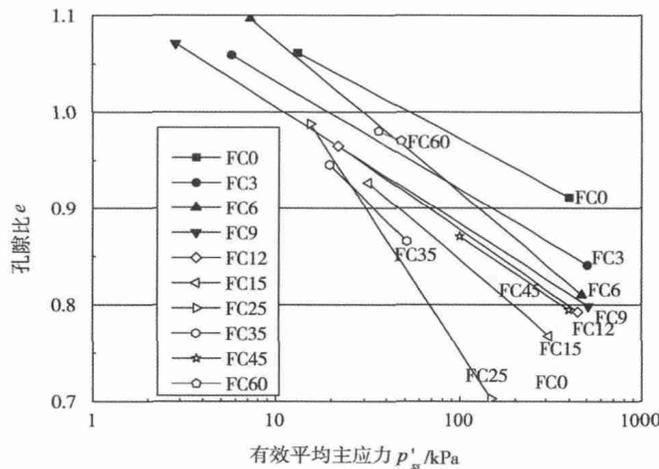


图6 无黏性混合土的稳态线

表3 稳态线拟合参数

	FC0	FC3	FC6	FC9	FC12	FC15	FC25	FC35	FC45	FC60
λ	1.1742	1.1438	1.2325	1.1263	1.1399	1.1669	1.3298	1.1923	1.1225	1.1094
κ	0.101	0.112	0.158	0.121	0.131	0.160	0.289	0.191	0.126	0.083

由图6及对比表3中 κ 的可知：随着细粒含量的增加，由FC0稳态线开始向下移动，直至FC25稳态线，在FC25稳态线之后各稳态线逐渐向上移动。稳态线斜率随细粒含量的变化见图7。由此可见，除了FC6存在斜率异常外，在FC25左右两侧斜率变化的趋势非常明显，由此，可认为南京砂构成的不同级配的无黏性混合土的临界细粒含量定为25%。

稳态线的概念是从抗液化势研究中提出来的，但其存在的临界细粒含量更是体现颗粒间的相互作用，即无黏性混合土从砂粒组控制土体性状到粉粒组控制土体性状的转变。因此，临界细粒含量

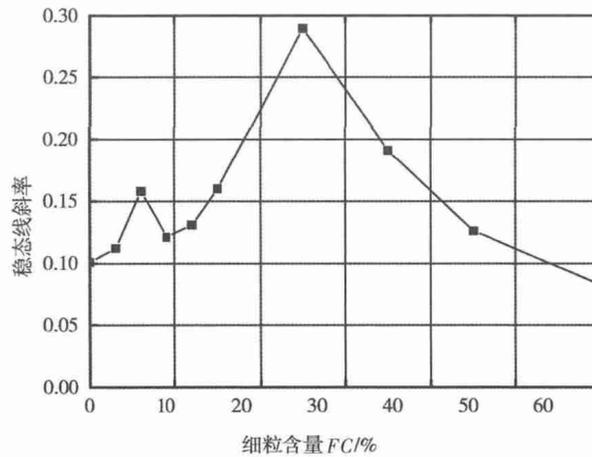


图7 无黏性混合土稳态线随细粒含量的变化曲线

对于土体稳态性状的研究也具有一定的理论意义。

6 结论

临界细粒含量是在考虑无黏性混合土颗粒级配、结构性对于力学性状影响的过程中提出的，其不应仅仅是颗粒级配和结构性特征的反映，也是力学性能的反馈。不同的土骨架，不同的充填细粒均可对临界细粒含量值产生重要影响。因此，对于临界细粒含量的确定应是从区间值逐步到某定值的过程，是一个相互验证的过程。

本研究通过各种方法对临界细粒含量进行了探讨和研究，得到以下结论：(1)在假设砂-粉二元结构的前提下，分别取得砂粒和细粒的孔隙比变化，运用三相草图进行计算可确定临界细粒含量的变化范围；(2)孔隙比的变化范围在一定程度上可反映砂粒和细粒之间的接触关系。最小孔隙比的变化较最大孔隙比更能反映细粒含量变化的情况；(3)分形理论是分析土体颗粒级配特征的新途径。本研究中在临界细粒含量处，土体分维的个数有明显变化；(4)稳态反映了土体的力学性质。临界细粒含量处稳态线的移动方向是不同的，由此可进一步验证临界细粒含量的存在和意义，其本质是反映土颗粒间的相互接触作用。

对无黏性混合土的物理特征研究最终应是与力学性质相对应的，因此，以上各种方法取得的临界细粒含量需相互验证。本研究得到以南京砂骨架为粗粒的无黏性混合土的临界细粒含量确定为25%。

参 考 文 献：

- [1] Ishihara K . Liquefaction and flow failure during earthquake[J] . Geotechnique ,1993 ,43(3) :351-415 .
- [2] Chang N Y , Yeh S T , Kaufman L P . Liquefaction potential of clean and silty sands[A] . Proc. 3th Int . Earthquake Microzonation Conf . ,1982 ,(2) :1017-1032 .
- [3] 朱建群,孔令伟,钟方杰 . 粉粒含量对砂土强度特性的影响[J] . 岩土工程学报 ,2007 ,29(11) :1647-1652 .
- [4] 王淑云,鲁晓兵,时忠民 . 颗粒级配和结构对粉砂力学性质的影响[J] . 岩土力学 ,2005 ,26(7) :1029-1032 .
- [5] 朱建群 . 含细粒砂土的强度特征与稳态性状研究[D] . 武汉 :中国科学院武汉岩土力学研究所 ,2007 .
- [6] Thevanayagam S , Shenthan T , Mohan S , et al . Undrained fragility of clean sands , silty sands , and sandy silts [J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,2002 ,128(10) :849-859 .
- [7] Thevanayagam S , Mohan S . Intergranular state variables and stress-strain behavior of silty sands[J] . Geotech-

- nique ,2000(50) :1-23 .
- [8] Lade P V ,Liggio C D ,Yamamuro J A . Effect of non-plastic fines on minimum and maximum void ratios of sand [J] . Geotechnical Test Journal ,1998 ,21(4) :336-347 .
- [9] Yang S L ,Lacasse S ,Sandven R . Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines[J] . Geotechnical Test Journal ,2006 ,29(2) :1-6 .
- [10] Yang Shaoli ,Rolf Sandven ,Feng Xiuli ,et al . Drained behavior of sand under low confining pressure[J] . 青岛海洋大学学报 ,2001 ,31(5) :441-447 .
- [11] 杨培岭 ,罗远培 ,石元春 . 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J] . 科学通报 ,1993 ,38(20) :1896-1899 .
- [12] 徐永福 ,刘斯宏 ,董平 . 粒状土体的结构模型[J] . 岩土力学 ,2001 ,22(4) :366-372 .
- [13] 周健 ,杨永香 ,贾敏才 ,等 . 细粒含量对饱和砂土液化特性的影响[J] . 水利学报 ,2009 ,40(10) :1184-1188 .
- [14] Poulos S J ,Castro G , France J W . Liquefaction evaluation procedure[J] . Journal Geotechnical Engineering Division ,ASCE ,1985 ,111(6) :772-791 .
- [15] Lade P V ,Yamamuro J A . Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands[J] . Canadian Geotechnical Journal ,1997 ,34 :918-928 .

Multi-ways to identify the transitional fine content of cohesionless soil with fines

ZHU Jianqun^{1,2} , KONG Lingwei³ , GAO Wenhua² , LI Xiongwei¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering , Changzhou Institute of Technology , Changzhou 213002 , China ;

2. School of Civil Engineering , Hunan University of Science and Technology , Xiangtan 411201 , China ;

3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering ,
Institute of Rock and Soil Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Wuhan 430071 , China)

Abstract : Transitional fine content (TFC) shows that the particle size distribution and structure of cohesionless soil with fines has significant effects on its mechanical property. It is an important and difficult question to determine TFC because it is a verified process mutually. It is assumed that the cohesionless soil with fine is a dualistic structure , including sand particle and silty particle. Based on a theoretical analysis of the influence to the void ratio by the particle skeleton , the scale of TFC was determined with basic physical indicators of soil. The maximum void ratio and minimum void ratio of mixed soil with different fines change with the shape of the particles and contact relationship each other. Thus TFC is a interval value. The particle size distribution was analyzed by the fractal theory , while the fractal dimensions of mixed soil were obtained. The TFC is the place where the fractal dimension is different. Steady state line shows the liquefaction resistance of cohesionless soil in the steady-state theory. The fine content at the change of steady line slope is TFC. The results obtained by the two latter methods are in the range of the two previous methods. By there methods , TFC of the remolded Nanjing sand with different sand and silt content is 25%.

Key words : transitional fine content ; dualistic structure ; void ratio ; fractal dimension ; steady state line

(责任编辑 : 李 琳)