

砂土质隧道围岩内摩擦系数的试验研究

王玉锁, 王明年, 陈炜韬, 魏龙海

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 砂土的内摩擦系数 $\tan\phi$ 与砂土质围岩稳定性有直接的关系。从影响砂土质围岩坑道稳定性因素及围岩稳定性分级的角度出发, 探讨了与砂土质隧道围岩稳定性相关的内摩擦系数 $\tan\phi$ 的影响因素, 发现砂土的细粒 ($d < 0.075$ mm) 含量对其有较显著的影响, 二者呈负相关; 砂土相对密实度 D_r 并非完全是越大而内摩擦系数 $\tan\phi$ 也越大, 还与细粒含量及软硬状态有关; 采用细粒含水率而不是砂土含水率的方法来评定潮湿砂土的 $\tan\phi$ 的影响是较为合理的方法, 并总结了细粒含水率对 $\tan\phi$ 的影响规律。

关 键 词: 隧道; 围岩分级; 砂土; 内摩擦系数; 细粒含量

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Test research on internal friction coefficient of sandy soil tunnel surrounding rock

WANG Yu-suo, WANG Ming-nian, CHEN Wei-tao, WEI Long-hai

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The internal friction coefficient ($\tan\phi$) of sandy soil exactly exerts influence on the stability of sandy soil surrounding rock. From the perspective of influencing factors of the stability of sandy soil surrounding rock and the stability classification of surrounding rock, this paper explores the influencing factors of internal friction coefficient which are related to the stability of sandy soil surrounding rock. It is discovered that the content of fine granules ($d < 0.075$ mm) of sandy soil has distinct influence on the internal friction coefficient of sandy soil. The relationship between the compactedness and internal friction coefficient is not always a direct ratio which is relevant to the content of fine granules of sandy soil and water content of fine granules. It is held that it is more rational to adopt the water content of fine granules rather than water content of sand soil to access the internal friction coefficient of moist sandy soil. This article also makes a conclusion for the influencing rules of the water content of fine granules on the internal friction coefficient of sandy soil.

Key words: tunnel; surrounding rock classification; sandy soil; internal friction coefficient; content of fine granules

1 引 言

普罗托奇耶柯诺夫于 1908 年提出用压力拱方法分析隧道的稳定和岩体受力状态, 即简称的普氏压力拱理论。普氏认为, 岩体内总是有许多大大小小的裂隙、层理、节理等软弱结构面的。由于这些纵横交错的软弱面, 将岩体割裂成各种大小的块体, 这就破坏了岩石的整体性, 造成松动性。被软弱面割裂而成的岩块与整个地层相比, 它们的几何尺寸较小。因此, 可以把洞室周围的岩石看作是没有凝聚力的大块散粒体。但是, 实际上岩石是有凝聚力

的。因此, 用增大内摩擦系数的方法来补偿这一因素。这个增大了的内摩擦系数称为岩石的坚固系数, 用 f_k 表示^[1]:

$$f_k = \frac{\sigma_n \tan\phi + c}{\sigma_n} = \frac{c}{\sigma_n} + \tan\phi \quad (1)$$

式中: σ_n 为正应力 (MPa); ϕ 为内摩擦角; c 为凝聚力 (MPa)。

用 f_k 表示岩土力学性质, 长期以来一直应用于不同目的的隧道中。近年来各部门在实际应用中普遍认为, 坚硬岩石区压力拱理论的基本假定不符合实际情况, 对于不同地质条件下的岩石坚固系数

f_k 应予以修正。但由于压力拱法计算简便, 因此, 在实际工作中尤其是在中小型隧道工程中, 仍在继续使用^[2]。从以上的分析来看, 以 f_k 作为围岩分级指标时, 对岩石体围岩来说, 并不能完全反映岩体开挖后的实际稳定情况, 但如果用来评定砂土质围岩时, 就不存在以上的问题, 因为砂土质围岩可以看作是松散体结构, 用 f_k 作为围岩分级指标来评定砂土质围岩开挖后稳定程度是比较合适的^[3,4]。在野外勘察时, 由于土体的力学指标不易获得, 而其他物性指标如土的密度、含水率、细粒含量及土的密实程度相对来说更容易获得, 而这些物性指标也是影响土体围岩开挖后稳定程度的重要指标, 如日本铁路隧道砂土质围岩分级方法中, 就采用了相对密实度 D_r 和细粒含量这两个指标^[5]。从式 (1) 中可以看出, 如以上覆土层的重量作为正向应力 σ_n 时, 由于此数值一般较大, 故 c/σ_n 对 f_k 的贡献较小, $\tan\phi$ 对 f_k 的贡献最大。如能总结出这些物性指标对砂土质围岩 $\tan\phi$ 的影响规律, 则可从砂土的天然物性指标值的大小来推断 f_k 的范围, 从而为砂土质隧道围岩用定量指标进行分级提供了可行的途径。同时, 由于土体的稳定性在很大程度上取决于土的抗剪强度指标^[6], 而其中 $\tan\phi$ 对抗剪强度的贡献最显著, 因而可以说, 用易于获取的物性指标来评定不易获取的土体 $\tan\phi$ 在整个岩土工程领域也是很有意义的。

对土体的物性指标与内摩擦系数相互关系的研究, 国内外从不同角度做过不少研究^[6-12], 但这些研究并没有从围岩分级的角度出发, 因而没有考虑围岩分级工作对所用指标的要求, 即指标要能较全面地反映围岩开挖后的稳定程度且易于获取, 并且要和当前勘察手段及有关规范要求相统一。根据现行《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 中对砂土的定义是: 粒径大于 2 mm 的颗粒质量不超过总质量的 50%, 粒径大于 0.075 mm 颗粒质量超过总质量 50% 的土^[13]。从此定义可知, 在砂土中是有小于 0.075 mm 的细粒存在的。而细粒的存在, 其含量的大小及细粒所含有的水分会影响到砂土质围岩的力学性和透水性^[14], 也是衡量砂土质围岩稳定性的重要因素。而细粒含量对内摩擦系数的影响要与其含水状态相结合才能全面评定, 影响内摩擦系数或砂土围岩稳定性的还有砂土密实程度这一因素, 对砂土密实程度的评定, 《岩土工程勘察规范》(GB50021—2001) 规定用标准贯入试验锤击数 N 值划分, 而 N 值与相对密实度 D_r 有较明确的对应关系, 且 D_r 在室内试验中易于控制。从砂土质隧道围岩分级的角

度出发, 本文利用人工配制的砂土, 通过改变对 $\tan\phi$ 有影响的 3 个因素: 相对密实度 D_r 、细粒含量及细粒含水率, 做了大量的不固结不排水直剪试验, 根据试验所得出的砂土围岩的 $\tan\phi$ 值, 分析了砂土质围岩 $\tan\phi$ 的影响因素及规律, 为砂土质隧道围岩分级研究工作打下一定的理论基础。

2 试验方案设计

本次试验采用全面组合试验方法, 共有 $4 \times 9 \times 5 = 180$ 种组合情况, 具体因素及水平见表 1。其中表示砂土密实程度的指标为相对密实度 D_r , 是通过最大、最小孔隙率及比重 G_s 与相对密实度 D_r 的换算关系来实现的^[15]。

表 1 因素及水平
Table 1 Factors and levels

因素	水平
相对密实度 D_r	0.1, 0.27, 0.5, 0.83
细粒含量/%	2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 37, 45
细粒含水率/%	18.75, 30.69, 37.85, 43.29, 49.31

而含水率是由细粒含水率来控制的。这是因为砂土的含水率在试验时不好控制, 对于含细粒多的土样, 其吸水量要大一些; 而细粒含量少的土样, 吸水量要小一些。若给定同样的含水率, 对细粒多的来说可能很干, 而对细粒小的量已经有自由水流出了, 因此, 有必要对其含水率作出规定。对于砂粒来说, 其吸水量很小, 饱和时得到的试验结果为 6%~7%。因此, 为了配样方便, 同时受文献[16, 17]的启发, 以细粒土的多少来确定试样的含水率。为了防止砂粒从土中吸水而影响砂土的含水率, 配样时将砂粒的含水率取为定值, 按 6% 配置。因此, 后面提到的含水率指细粒的含水率, 而不是整个砂土的含水率。

所用的砂粒为四川乐山夹江产地的河砂, 其级配如表 2 所示, 属于中砂。

表 2 试验用砂粒的级配
Table 2 Gradation of sand for testing

粒径/mm	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
级配/%	5.92	36.92	26.86	29.03	1.27

为便于试验控制和计算, 经过筛分去除了粒径大于 2 mm 和小于 0.075 mm 的颗粒, 而人工加入规定掺量的细粒土。所用的细粒土为峨眉黄湾黏土, 其物理特性指标如表 3 所示。

表3 试验用细粒物理特性指标
Table 3 Physical characteristic of testing clay

塑限 / %	液限 / %	塑性指数	液性指数	含水率 / %	软硬状态
28.3	47.4	19.1	-0.5	18.75	坚硬
28.3	47.4	19.1	0.125	30.69	硬塑
28.3	47.4	19.1	0.5	37.85	可塑
28.3	47.4	19.1	0.785	43.29	软塑
28.3	47.4	19.1	1.1	49.31	流塑

3 试验结果及分析

本试验方案的思路就是人工配制的砂土在不同的密实程度、含水率及细粒含量条件下，通过直剪试验测得相应的 $\tan\phi$ 。砂土不同成分组合下所对应的 $\tan\phi$ 结果见表4（共有180种组合，这里只列出了部分试验数据）。

表4 试验结果
Table 4 Results of test

试件编号	$\tan\phi$	试件编号	$\tan\phi$	试件编号	$\tan\phi$
1-1-1	0.71	4-1-1	0.57	7-1-1	0.63
1-1-2	0.69	4-1-2	0.56	7-1-2	0.51
2-2-3	0.63	5-2-3	0.58	8-2-3	0.54
2-2-4	0.65	5-2-4	0.62	8-2-4	0.52
3-3-5	0.64	6-3-5	0.53	9-3-5	0.17
3-4-1	0.70	6-4-1	0.54	9-4-1	0.65

注：表中试验编号的第1项中的数值1, 2, 3, ..., 9, 依次代表的是细粒含量为2%, 5%, 10%, ..., 45%；试验编号的第2项中的数值1, 2, 3, 4, 则依次代表相对密实度 $D_r = 0.1, 0.27, 0.5, 0.83$ ；试验编号的第3项中的数值1, 2, ..., 5 依次代表细粒含水率18.75%, 30.69%, ..., 49.31%。如编号1-2-4试件的砂土成分为：细粒含量为2%，相对密实度 $D_r = 0.27$ ，细粒含水率为43.29%。

3.1 相关性分析

根据试验所得的数据，用专业统计软件 SPSS 作了 $\tan\phi$ 与细粒含量、 D_r 及细粒含水率之间的相关分析^[18]，结果如表5所示。

表5 相关系数
Table 5 Correlations

参数	细粒含量 / %	相对密实度 D_r	细粒含水率 / %
$\tan\phi$ 相关系数	-0.694**	0.196**	-0.184*

注：**表示在0.01水平检验下是显著相关的(双尾检验)，*表示在0.01水平检验下是显著相关的(双尾检验)。

通过相关分析表明， $\tan\phi$ 与3个因素都是显著相关的，相关系数分别为-0.694, 0.196 和 -0.184。这只是从数据结果总体上来分析的，说明3个因素对砂土 $\tan\phi$ 的影响程度从大到小次序为：细粒含量 $> D_r >$ 细粒含水率。

3.2 曲线图分析

仅用相关分析还不能完全说明三者相互之间与砂土 $\tan\phi$ 的关系。从相关分析可知，总体上细粒含水率与其成负相关关系。但细粒含水率是与细粒含量相依从的。分析它对 $\tan\phi$ 的影响，必须与细粒含量结合起来考虑。同时，细粒含水率对 $\tan\phi$ 的影响与砂土的紧密程度有无关系，也是应考虑的。所以，考虑单个因素对 $\tan\phi$ 的影响，必须同时考虑其他两因素的作用。为此，分析时，采用控制某一因素，另一因素水平作为系列，绘出第三因素与 $\tan\phi$ 的关系曲线图来具体分析三因素与它的关系。这样做比用偏相关分析^[18, 19]能更直观地反映它们之间的关系。

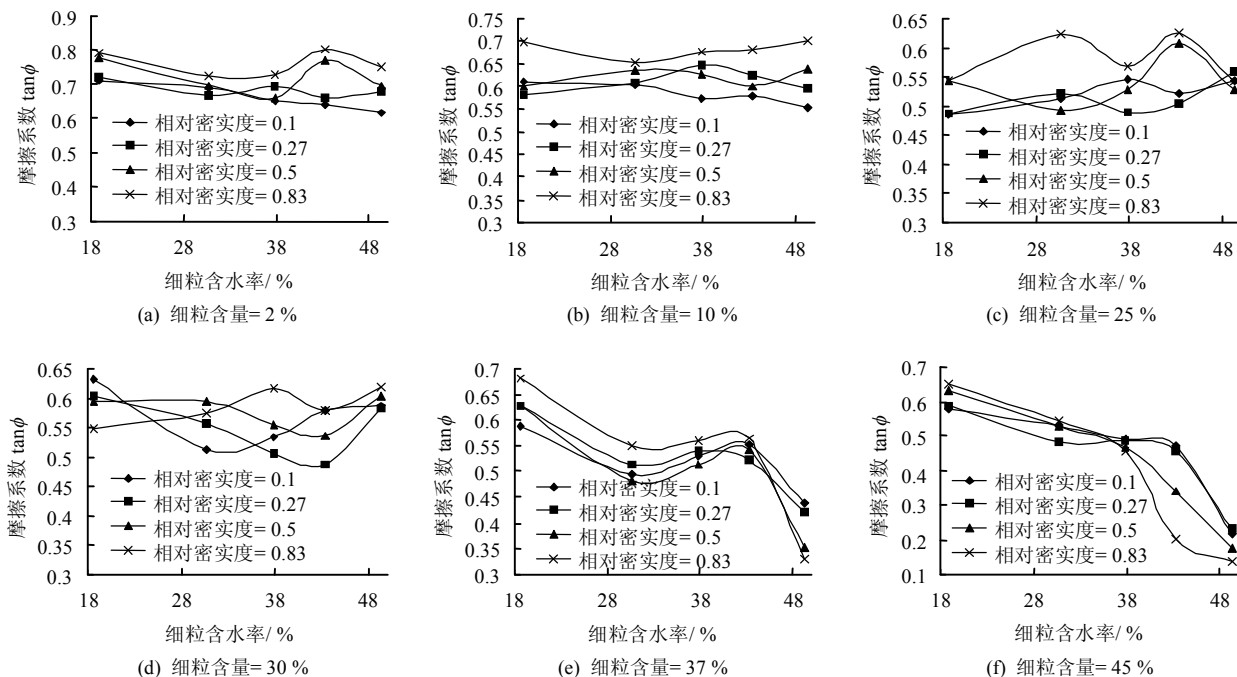
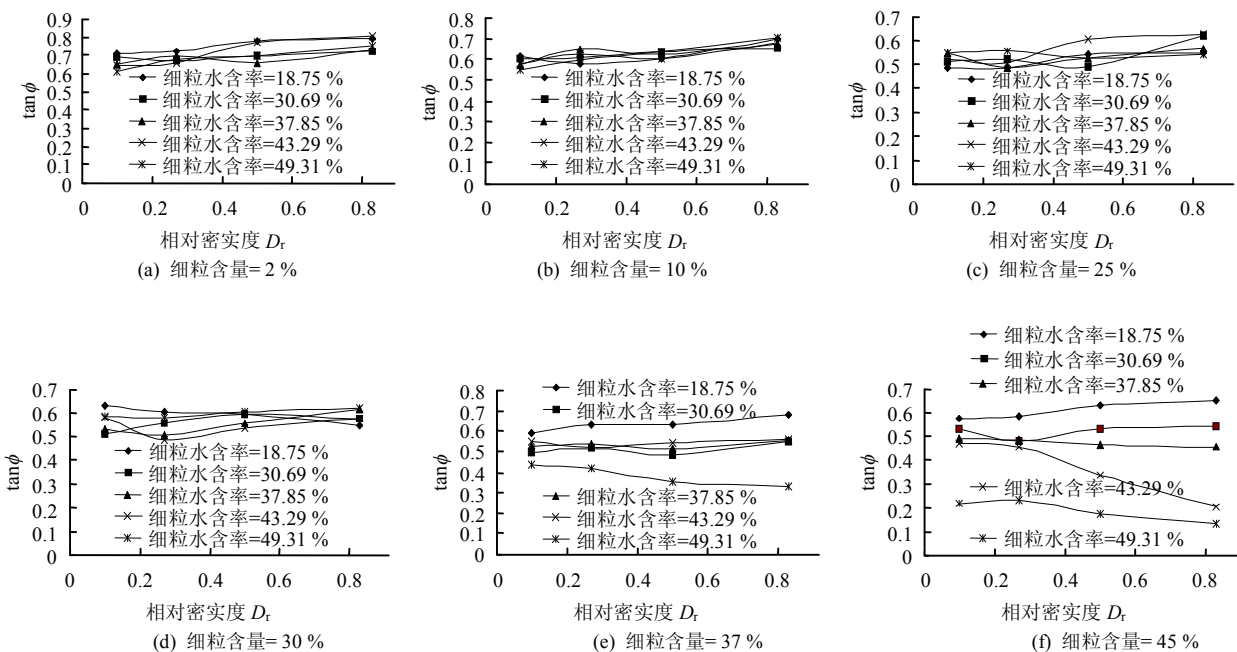
3.2.1 细粒含水率与 $\tan\phi$ 的关系

将不同细粒含量所对应的细粒含水率与砂土 $\tan\phi$ 的关系曲线图（图1）列出以供参考。限于篇幅，这里只列出其中具有代表性的细粒含量的关系曲线图。

从图1可以看出，当细粒含量在30%以内时，含水率的变化对砂土 $\tan\phi$ 影响较小，即减小的趋势不明显；细粒含量大于30%后，随细粒含水率的增大而呈较明显的减小趋势，相对密实度越大，减小的趋势越明显。从细粒含量为37%和45%时的 $\tan\phi$ 与细粒含水率的关系曲线可以看出，在细粒含水率为43.21%和37.85%处有较明显的分界点，所以，可以将细粒含水率=37.85%，即细粒处于可塑状态作为细粒含水率的分界点值。

3.2.2 D_r 与 $\tan\phi$ 的关系

由3.1节分析知，总体上相对密实度越大，砂土内摩擦系数越大，二者呈正相关。但所绘出的曲线图却存在不同的情况：（1）当细粒含量在30%范围内， $\tan\phi$ 随相对密实度的增大而增大；（2）当细粒含量大于30%后，如细粒含量为45%时，且细粒含水率超过37%后，即细粒处于可塑、软塑和流塑状态时， $\tan\phi$ 随相对密实度的增大而减小；当细粒含量为37%时，细粒含水率为49.31%时，即细粒处于流塑状态时， $\tan\phi$ 随相对密实度的增大而减小。出现此情况的原因的解释是，当砂土中细粒含量大并且含水较多时，砂土的挤压使起润滑作用的细粒土作用更明显，从而使砂土 $\tan\phi$ 整体上降低。为说明以上分析，将不同细粒含量下所对应的相对密实度与砂土 $\tan\phi$ 的关系曲线图列出以供参考（图2）。限于篇幅，这里只列出部分曲线图以供参考。

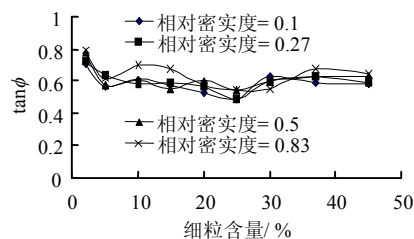
图1 细粒含水率与内摩擦系数 $\tan\phi$ 的关系(细粒含量不变)Fig.1 Internal friction coefficient ($\tan\phi$) changing with water content of clay when the content of fine granules is fixed图2 相对密度 D_r 与内摩擦系数 $\tan\phi$ 的关系(细粒含量不变)Fig.2 Internal friction coefficient ($\tan\phi$) changing with D_r when the content of fine granules is fixed

3.2.3 细粒含量与 $\tan\phi$ 的关系

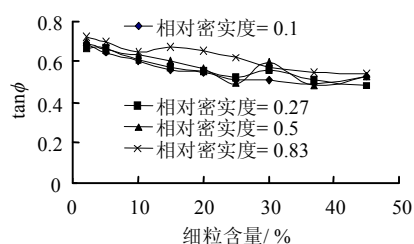
从 3.1 节的相关分析知, 三因素中, 细粒含量对砂土 $\tan\phi$ 的影响最显著, 二者呈负相关关系。但从所绘出的曲线图(图 3)看, 情况并非完全如此, 而是和细粒的软硬状态及细粒含水率有关。从图 3 可以看出, 当细粒含水率 = 18.75% 时, 即细粒处于坚硬状态时, 在细粒含量小于 10% 时, $\tan\phi$ 随细粒含量的增多在减小; 当细粒含量大于 10% 后, 减

少的趋势并不明显; 当砂土中所含细粒处于硬塑及更软状态时, 随着细粒含水率的增大, $\tan\phi$ 随细粒含量的增大而减小的程度越大; 当细粒含水率为 49.31%, 即处于流塑状态时, 在细粒含量为 30% 处有明显的分界点。本次试验所得到的这个规律和文献[7]的结论是一致的。这说明在黏粒含量较高时, 砂粒较均匀的分布在黏粒介质中, 粒间被黏粒充填, 粗颗粒被隔开, 受剪切作用时, 主要在黏粒

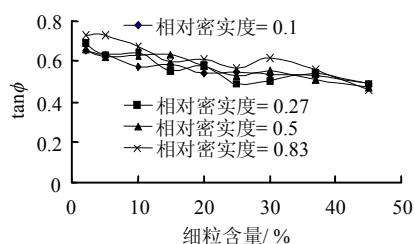
中滑动, 并有利于颗粒的定向排列, 因此抗剪强度较低。黏粒含量低时, 在遭受剪切作用时, 粗颗粒起到骨架的作用, 这有利于强度的提高, 一旦黏粒含量增加, 砂粒的这种骨架作用就会很快消失^[9]。



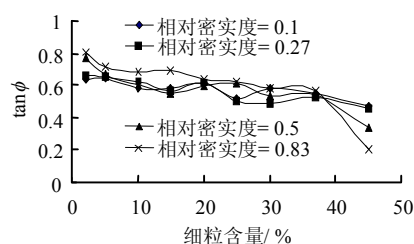
(a) 细粒含水率=18.75 %



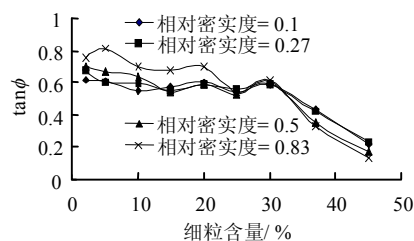
(b) 细粒含水率=30.69 %



(c) 细粒含水率=37.85 %



(d) 细粒含水率=43.29 %



(e) 细粒含水率=49.31 %

图3 细粒含量与内摩擦系数 $\tan\phi$ 的关系
(固定相对密度 D_r)

Fig.3 Internal friction coefficient ($\tan\phi$) changing with the content of fine granules when the D_r is fixed

3.3 试验小结

从以上的分析可以得出以下的结论:

(1) 从总体上来看, 对砂土 $\tan\phi$ 影响程度最大的是砂土的细粒含量, 二者呈负相关; 相对密实度 D_r 次之, 二者呈正相关关系; 细粒含水率要与细粒含量结合起来才能分析其对砂土内摩擦系数的影响, 总体上二者呈负相关关系。砂土的细粒含量、细粒含水率及密实程度 (用相对密实度 D_r 控制) 3 个因素, 对砂土的 $\tan\phi$ 的影响是相互关联的, 必须同时考虑而不能单独来分析各因素对它的影响。

(2) 砂土的密实程度对 $\tan\phi$ 的影响与细粒含量及软硬状态有关: 当细粒含量在 30 % 范围内, $\tan\phi$ 是随相对密实度的增大而增大; 当细粒含量大于 30 % 且细粒含水率超过 37 % 后, 即细粒处于可塑、软塑和流塑状态时, $\tan\phi$ 随相对密实度的增大而减小。

(3) 细粒含量与砂土 $\tan\phi$ 的关系呈负相关, 细粒含水率越大, 即细粒越软, 随细粒含量的增大而减小的趋势越显著。

(4) 细粒含量 $\leq 30\%$ 时, 细粒含水率即细粒的软硬状态对 $\tan\phi$ 的影响较小; 当细粒含量 $> 30\%$ 后, $\tan\phi$ 随细粒含水率的增大而减小, 细粒含量越大, 减小的趋势越明显。

4 结 论

本文从影响砂土质围岩内摩擦系数的 3 个因素入手, 探讨了细粒含量、细粒含水率及相对密实度 D_r 对砂土围岩内摩擦系数 $\tan\phi$ 的影响规律。所得出的结论大多是定性的, 也没有回归出相应的定量表达式。这是因为对于砂土质围岩内摩擦系数的类似研究并不多, 因素影响规律的机制也很复杂, 定量表达式并不能全面反映影响规律。从试验结果看, 细粒含量为 30 % 可以作为一个分界点来分析细粒含水率及相对密实度对砂土稳定性的影响规律, 细粒含水状态即软硬程度中的“可塑”可以作为一个分界点来分析其他两因素对内摩擦系数的影响, 这个规律在文献[7]中也有类似结论, 说明本规律具有广泛性, 这在研究砂土质隧道围岩分级时有很大的意义。一般认为, 砂土越紧密, 即相对密实度 D_r 越大, 砂土越坚固, 但试验结果说明情况并非完全如此, 而是和细粒含量及细粒软硬程度 (细粒含水率) 有关。

参 考 文 献

- [1] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993: 125—126.

- [2] 崔中兴, 宋克强. 隧洞围岩破坏准则的研究[J]. 西北水资源与水工程, 1994, 5(1): 7—13.
CUI Zhong-xing, SONG Ke-qiang. Studies on the failure criterion of rock tunnel[J]. **Water Resources and Water Engineering**, 1994, 5(1): 7—13.
- [3] 刘佑荣, 唐辉明. 岩体力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 161.
- [4] 陈守真, 许长新. 两种地压理论的分析及其思考[J]. 水利科技, 2001, 5(3): 21—23.
CHEN Shou-zheng, TANG Hui-ming. Research on the two kinds of ground pressure theories[J]. **Hydraulic Science and Technology**, 2001, 5(3): 21—23.
- [5] 沈中其, 关宝树. 铁路隧道围岩分级方法[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000.
- [6] 陈愈炯. 总强度指标的测定和应用[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 32—34.
CHEN Yu-jiong. Measurement and application of the total shear strength parameters[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2000, 33(4): 32—34, 41.
- [7] 汤连生, 张鹏程, 王洋, 等. 土体内外摩擦及摩擦强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 974—979.
TANG Lian-sheng, ZHANG Peng-cheng, WANG Yang, et al. Testing study on internal and external friction and frictional strength of soils[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(6): 974—979.
- [8] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱夹层黏粒含量与抗剪强度参数的关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(2): 56—60.
TANG Liang-qin, NIE De-xin, REN Guang-ming. The relational analysis between the clay grain content and strength characteristics of weak intercalated layer[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2003, 14(2): 56—60.
- [9] 唐良琴, 聂德新, 任光明. 软弱结构面粒度成分与抗剪强度参数的关系探讨[J]. 工程地质学报, 2003, 11(2): 143—147.
TANG Liang-qin, NIE De-xin, REN Guang-ming. Discussion on the relational between granulometric composition and shear strength parameter of weak structural plane[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2003, 11(2): 143—147.
- [10] 余宏明, 胡艳欣. 红色泥岩风化含砾黏土的抗剪强度参数与物理性质相关性研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 93—95.
YU Hong-ming, HU Yan-xin. Research on the relativity between the strength of red mudstone weathered pebble soil and physical characters[J]. **Geological Science and Technology Information**, 2002, 21(4): 93—95.
- [11] 李会中, 潘玉珍, 王复兴. 三峡库区奉节县新城区滑坡带抗剪参数试验研究[J]. 湖北地矿, 2002, 16(4): 28—32.
- [12] 赵慧丽, 张弥, 张昭平. 含水率对北京地区非饱和土抗剪强度影响的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2001, 14(4): 30—33.
ZHAO Hui-li, ZHANG Mi, LI Zhao-ping. The study of water content influence on unsaturated soil shear strength by test[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute**, 2001, 14(4): 30—33.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [14] 郭庆国. 粗粒土的工程特性及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998: 16—21.
- [15] 刘成宇. 土力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 24—27.
- [16] 时卫民, 郑宏录, 刘文平, 等. 三峡库区碎石土抗剪强度指标的试验研究[J]. 重庆建筑, 2005, 17(2): 30—35.
SHI Wei-ming, ZHENG Hong-lu, LU Wen-ping, et al. Experiment research on shear strength index of gravel—soil in Three Gorges Teservoir area[J]. **Chongqing Architecture**, 2005, 17(2): 30—35.
- [17] 顾成权, 孙艳. 土体内聚力随含水率、黏粒含量及干密度变化关系探讨[J]. 水文地质工程地质, 2005, 25(1): 34—36.
GU Cheng-quan, SUN Yan. Discussion on the cohesion of soil changing with water content, cohesive soil content and dry density[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2005, 25(1): 34—36.
- [18] 林杰斌, 陈湘, 刘明德. SPSS11 统计分析实务设计宝典[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002: 115—118.
- [19] 马庆国. 管理统计-数据获取、统计原理、SPSS 工具与应用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 242—243.