

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1607-07

砂类土体隧道围岩压缩模量的试验研究

王玉锁, 王明年, 童建军, 魏龙海

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 砂类土的压缩模量与砂类土体隧道围岩稳定性有较大的关系。从影响砂类土体隧道围岩稳定性因素及围岩稳定性分级的角度出发, 探讨了与砂类土体隧道围岩稳定性相关的压缩模量的影响因素, 发现砂类土的细粒($d < 0.074$ mm)含量对其压缩模量有较显著的影响, 二者呈负相关; 砂类土的相对密实度并非完全是越大而压缩模量也越大, 还与细粒含量及细粒含水状态有关; 采用砂类土细粒含水率而不是砂类土含水率的方法来评定潮湿砂类土的压缩模量, 得出了细粒含水率对砂类土压缩模量的影响规律。根据细粒含量和相对密实度对压缩模量的影响规律, 提出了两指标的分级界限。

关 键 词: 隧道; 围岩分级; 砂类土; 压缩模量; 细粒含量

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

Test research on compression modulus of sandy soil tunnel surrounding rock

WANG Yu-suo, WANG Ming-nian, TONG Jian-jun, WEI Long-hai

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

Abstract: The compression modulus of sandy soil exerts influence on the stability of sandy soil surrounding rock of tunnel. From the perspective of influential factors of the stability of sandy soil surrounding rock and the stability classification of surrounding rock, the influential factors of compression modulus which are related to the stability of sandy soil surrounding rock, are explored. It is discovered that the clay content ($d < 0.074$ mm) of sandy soil has distinct influence on the compression modulus of sandy soil; The relationship between the compactness and compression modulus is not always a direct ratio which is relevant to the clay content of sandy soil and water content of clay. It is held that it is more rational to adopt the water content of clay rather than water content of sandy soil to access the compression modulus of moist sandy soil. Recommended limits of content of clay and compactness for surrounding rock classification are advanced in accordance with the relationships between compression modulus and content of clay, compactness.

Key words: tunnel; surrounding rock classification; sandy soil; compression modulus; content of clay

1 引 言

我国现行《公路隧道设计规范》^[1]对岩石隧道围岩采用了《工程岩体分级标准》^[2]的分级方法。它是针对岩石隧道及其他地下工程提出的, 不包括土体围岩分级。为了适应公路隧道的实际情况和需要, 将围岩级别分为 6 级。其中土体围岩分级引用了《铁路隧道设计规范》^[3]的相关内容。但这种分级方法经验的成分较大, 有一定的人为因素和不确定性, 在实际应用中存在不少的问题^[1]。因此, 有必要对土体采用公路隧道围岩定量指标方法进行分级研究。而对围岩稳定性有影响的指标, 必定对围

岩的力学参数如抗剪强度指标及变形模量 E_0 等有较大影响。其中, 变形模量是结构数值分析中必须的力学参数。但在野外勘察时, 由于土体的变形模量不易获得^[4], 而往往是通过压缩模量与变形模量的理论关系进行换算来评定土体变形性能的^[5]。所以, 压缩模量可以说是评定隧道围岩稳定性的间接指标。同时, 土的压缩模量是用来评价地基土的压缩性和计算地基土变形的重要参数, 室内试验可以方便地测出上述参数。我国地基基础设计规范通常采用分层总和法计算沉降, 只需要提供地基土的压缩模量即可。因此, 目前的岩土工程勘察报告一般都不提供土的变形模量。以往发表的研究论文或技

收稿日期: 2006-11-20

基金项目: 西部交通建设科技项目 No. (2004-318-000-30)。

作者简介: 王玉锁, 男, 1974 年生, 讲师, 博士研究生, 主要从事方面隧道及地下工程的研究工作。E-mail: wangysuo@163.com

术资料中多数也是采用土的压缩模量^[6]。基于以上原因,在评定砂类土隧道围岩稳定性时,如何采用其他物性指标(如土的含水率、细粒含量及土的密实程度)来评定砂类土体围岩的压缩模量是很有意义的。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,如日本铁路隧道砂类土体围岩分级方法中,就采用了相对密实度 D_r 和细粒含量这两个指标^[7]。现行《公路土工试验规程》中对砂类土的定义是:粗粒土中砾粒组质量少于或等于总质量 50% 的土称砂类土^[8]。从此定义可知,在砂类土中是有小于 0.074 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类土质围岩的力学性和透水性^[9],也是衡量砂类土质围岩稳定性的重要因素。而细粒含量对压缩模量的影响要与其含水状态相结合才能全面评定。影响压缩模量的还有砂类土密实程度这一因素,对砂类土密实程度的评定,在《公路工程地质勘察规范》及《岩土工程勘察规范》中规定用标准贯入试验锤击数 N 值划分,而 N 值与相对密实度有较明确的对应关系^[10,11],且 D_r 在室内试验中易于控制。从评定砂类土体隧道围岩稳定性的角度出发,本文利用人工配制的砂类土,对影响压缩模量的 3 个因素(相对密实度 D_r 、细粒含量及细粒含水率)进行了大量的固结压缩试验,得出砂类土的压缩模量值。由于目前一般采用 100~200 kPa 竖向压力的压缩模量 E_{1-2} ,故本次试验也采用 E_{1-2} 来研究。

2 试验方案设计

为尽量降低室内压缩试验误差的影响,本次试验采用因素组合试验方法。这样做虽然工作量较大,但数据较全面,在进行数据分析时,尤其是进行相关分析或回归分析时可靠性要较正交设计或均匀设计等方法高。其中细粒含量为 18.75%, 37.85%, 49.31%, 采用全面组合方法共有 $4 \times 9 \times 3 = 108$ 种组合情况,而细粒含水率为 30.69% 和 43.29%,是与细粒含量为 37% 和 45% 及相对密实度 D_r 为 0.67, 0.83 进行组合,分为 10 种,共有 118 种组合情况,具体因素及水平见表 1。

表 1 因素及水平
Table 1 Factors and levels

因素	水平				
D_r	0.27,	0.50,	0.67,	0.83	
$W/\%$	2, 5,	10,	15,	20,	25, 30, 37, 45,
$W_L/\%$	18.75,	30.69,	37.85,	43.29,	49.31

注: W 为细粒含量; W_L 为细粒含水率。

其中表征砂类土密实程度的相对密实度 D_r 是通过最大、最小孔隙比及比重 G_s 与相对密实度 D_r 的换算关系来实现的^[12]。

含水率是由细粒含水率来控制的。这是因为砂类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,对细粒多的土样来说可能很干,而对细粒含量少的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,受文献[13, 14]的启发,为了配样方便,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类土的含水率,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。而不是整个砂类土的含水率。对于细粒含水率的测定方法,可首先测出砂类土的总含水率,再根据《公路土工试验规程》中“颗粒分析试验”方法测出小于 0.074 mm 的细粒含量^[8],同时测出大于 0.074 mm 砂粒的饱和含水率,用总含水率减去砂粒的饱和含水率,就是细粒的含水率了。

所用的砂粒为四川乐山夹江产地的河砂,所用砂粒的级配如表 2 所示,属于中砂。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 0.074 mm 的细粒,再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 2 试验用砂粒的级配
Table 2 Gradation of sand for testing

参数	粒径/mm				
	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.074	<0.074
级配/%	5.92	36.92	26.86	29.05	1.25
比重 G_s	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61
最大孔隙比 $e_{\max}$	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
最小孔隙比 $e_{\min}$	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51

表 3 试验用细粒物理特性指标
Table 3 Physical characteristics 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	-0.500	18.85	坚硬
28.3	47.4	19.1	0.125	30.70	硬塑
28.3	47.4	19.1	0.500	37.90	可塑
28.3	47.4	19.1	0.785	43.30	软塑
28.3	47.4	19.1	1.100	49.31	流塑

3 试验结果及分析

本试验方案的思路就是以人工配制的砂类土在不同的密实程度、含水率及细粒含量条件下,通过压缩试验测得相应的压缩模量 E_{1-2} 。砂类土不同成分组合下所对应的部分压缩模量 E_{1-2} 结果见表 4。

表 4 试验结果
Table 4 Results of test

编号	E_{1-2} /MPa	编号	E_{1-2} /MPa	编号	E_{1-2} /MPa
1-1-1	35.505	3-1-1	20.276	6-1-1	3.249
1-2-2	38.507	3-2-2	17.849	6-1-2	2.687
1-3-3	39.796	3-2-3	15.194	7-4-1	20.595
1-4-1	49.832	3-3-1	39.230	7-4-2	16.168
1-4-2	46.271	3-3-2	27.973	8-3-1	14.542
2-1-1	33.537	4-1-1	13.721	8-3-4	5.353
2-2-2	30.495	4-1-2	9.488	9-4-4	9.621
2-3-3	39.703	4-1-3	3.797	9-4-2	9.849
2-4-2	44.151	4-2-1	17.287	9-4-5	3.486
2-4-3	40.629	5-1-1	6.711	9-4-3	2.839

注: 试验编号的第 1 项中的数值 1~9, 依次是细粒含量为 2 %, 5 %, 10 %, ..., 45 %; 试验编号第 2 项中的数值 1~4, 依次指相对密度 D_r 为 0.27, 0.5, 0.67, 0.83; 试验编号第 3 项中的数值 1~5, 依次指细粒含水率为 18.75 %, 37.85 %, 49.31 %, 30.69 %, 43.29 %。如编号为 1-2-3 试件的砂类土成分为: 细粒含量为 2 %, 相对密度 D_r 为 0.5, 细粒含水率为 49.31 %。

3.1 统计分析

根据试验所得的数据, 首先进行了压缩模量 E_{1-2} 与细粒含量 W 、相对密度 D_r 及细粒含水率 W_L 之间的相关分析, 结果如表 5 所示。

表 5 相关系数
Table 5 Correlations

参数	W	D_r	W_L
与 E_{1-2} 的相关系数	-0.791**	0.329**	-0.195*

注: 上标** 表示在 0.01 水平下用双尾检验是显著相关的; 上标* 表示在 0.05 水平下用双尾检验是显著相关的。

相关分析结果表明, E_{1-2} 与 W , D_r , W_L 都是显著相关的, 相关系数分别为 -0.791, 0.329, -0.195。这是从数据结果总体上来分析的, 说明 3 个因素对砂类土 E_{1-2} 的影响程度从大到小次序为: $W > D_r > W_L$ 。

由于三因素与 E_{1-2} 都是显著相关的, 所以又进行了多元回归分析, 分析结果如表 6 所示。

由于三因素回归系数的 t 显著性概率都为 0, 说明三因素都应当作为解释变量出现在方程中^[15]。压缩模量 E_{1-2} 与三因素的回归表达式可表示为

$$E_{1-2} = 29.315 - 0.788W + 23.822D_r - 0.248W_L \quad (1)$$

式中: E_{1-2} 为 100~200 kPa 竖向压力下的压缩模量

(MPa)。

表 6 回归系数及显著性检验表

Table 6 Regression coefficients and significant test

参数	非标准化回归法		t 值	显著性 Sig.
	系数	标准误差		
常数项	29.315	2.599	11.281	0
W	-0.788	0.042	-18.987	0
D_r	23.822	2.853	8.349	0
W_L	-0.248	0.049	-5.065	0

3.2 曲线图分析

由相关分析和回归分析可知: 总体上, 砂类土压缩模量与细粒含水率成负相关关系, 但细粒含水率是与细粒含量相依存的, 分析它对 E_{1-2} 的影响, 必须与细粒含量结合起来考虑; 同时, 细粒含水率对 E_{1-2} 的影响与砂类土的紧密程度有无关系, 也是应考虑的。所以考虑某一因素对 E_{1-2} 的影响, 必须同时考虑其他两因素的作用。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 E_{1-2} 的关系曲线图来分析三因素对 E_{1-2} 的影响关系, 这样的曲线图能较直观地反映 E_{1-2} 与三因素的关系。

3.2.1 压缩模量 E_{1-2} 与细粒含量 W 的关系

图 1 为各密实程度下 E_{1-2} 与 W 的关系曲线。从图中可以看出, 当细粒含量小于 20 % 时, E_{1-2} 随 W 的增大而呈较明显的减小趋势。在 W 为 2 % 和 5 % 时, 不同细粒含水率对应的曲线上下分布有交叉现象。也就是说, 并不完全是含水率越小 E_{1-2} 就越大。对于含水率对非饱和土压缩模量的影响, 文献[16]认为, 由于含水率变化引起的非饱和土的最终变形表现为“膨胀”还是“沉降”取决于土的重度的增大和基质吸力的下降两方面的综合效应。由于本次研究是从围岩稳定性分级角度出发, 目的是能找到影响压缩模量大小的物性指标的分界点。从曲线图看, 即使由于含水率的增大而引起 E_{1-2} 的增大, 这种增大也是比较小的, 对确定分级界限影响不大。所以本次研究没有再对上述文献提出的问题进行深入研究。

当细粒含量大于 20 % 后, 从图 1 可以看出, 细粒含量的变化对 E_{1-2} 的影响较小, 在此细粒含量范围内, 当密实状态和细粒含水率一定时, E_{1-2} 基本保持不变或变化很小; 在此细粒含量范围内, 当 D_r 为 0.27, 即砂类土呈较松散状态时, 不同细粒含水率下曲线重合在一起, 此时 E_{1-2} 基本保持为常数; 当 $D_r \geq 0.5$ 时, 即砂类土呈中密及以上时, D_r 越大,

不同细粒含水率对应的曲线上下分离越明显,越没有交叉现象;也就是说,在此细粒含量范围内,当细粒含量和密实程度一定时,细粒含水率越小,对应的 E_{1-2} 越大。

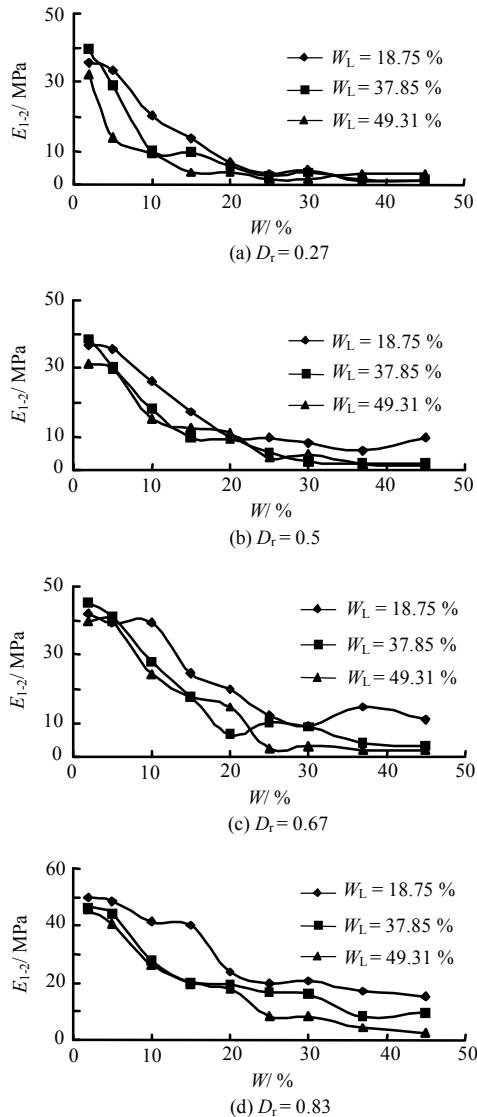


图1 E_{1-2} 与细粒含量 W 的关系 (固定 D_r)

Fig.1 Compression modulus E_{1-2} changing with content of clay W when the D_r is fixed

综上所述,从 E_{1-2} 值的分布来看,可以将细粒含量分为 3 个阶段:第 1 阶段 $W \leq 5\%$,此范围内对应的压缩模量最大;第 2 阶段为 W 在 $5\% \sim 20\%$ 范围内,所对应的压缩模量变化幅度较大;第 3 阶段为 $W \geq 20\%$,是压缩模量随细粒含量增大而基本保持不变或变化较小的阶段。

由 3.1 节的相关分析可知,细粒含量是影响 E_{1-2} 的最关键因素,且图 1 的曲线规律性较好,这里对不同密实程度对应的细粒含量与 E_{1-2} 关系曲线用统计软件 SPSS 中提供的 11 种曲线方程(包括线性、对数、逆曲线、二次、三次、幂函数、混合曲线、

S 型、Logistic 曲线、生长曲线、指数等曲线模型)进行了曲线拟合^[17]。结果显示,拟合曲线方程都具有显著性(即显著性水平 $\text{Sigf} = 0$), $D_r = 0.27$ 和 $D_r = 0.5$ 时, E_{1-2} 与 W 的关系用三次曲线方程拟合效果最好,而 $D_r = 0.67$ 和 $D_r = 0.83$ 时,则是用二次曲线拟合情况最好。各密实状态对应的 E_{1-2} 与 W 的拟合曲线见图 2。

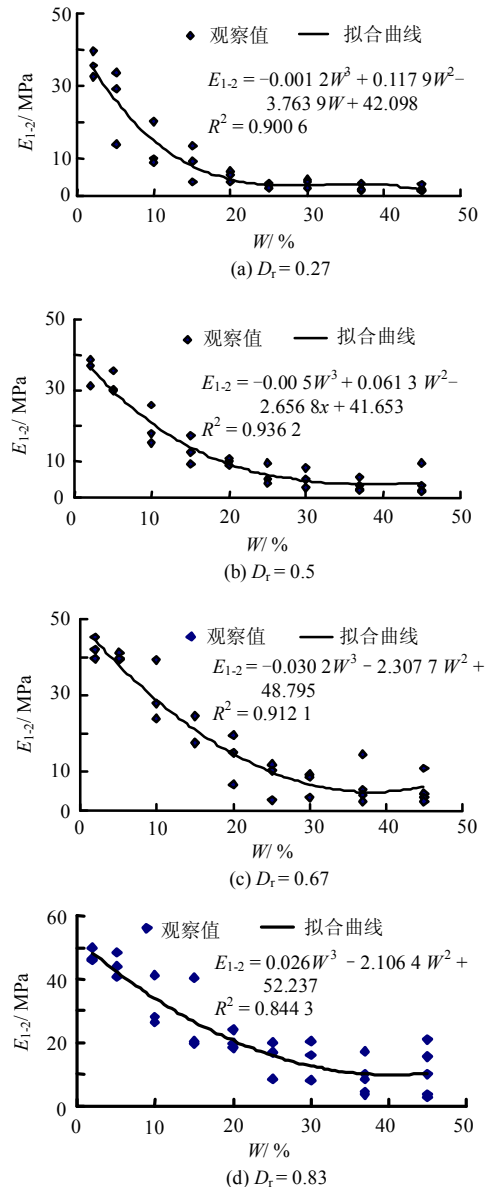


图2 E_{1-2} 与细粒含量 W 的拟合曲线 (D_r 不变)

Fig.2 Curve estimation for compression modulus E_{1-2} changing with content of clay W when the D_r is fixed

3.2.2 压缩模量 E_{1-2} 与相对密实度 D_r 的关系

由 3.1 分析知,总体上,相对密实度越大,砂类土 E_{1-2} 越大,二者呈正相关。图 3 也基本反映了上述情况。当细粒含水率为 49.31% ,且细粒含量大于 20% 时, D_r 对 E_{1-2} 影响很小,即使 $D_r = 0.83$ 时,对应的 E_{1-2} 也是小于 $D_r = 0.27$ 但细粒含量为 2%

和 5 %所对应 E_{1-2} 的。这说明, 如果把压缩模量的大小作为评定影响砂类土隧道围岩开挖稳定性的一个重要参数时, 应当把细粒含量作为第 1 评价指标, 而不是反映砂类土的密实程度指标的 D_r 。当把 D_r 作为评定砂类土隧道围岩稳定性的第 2 指标时, 从图 3 中的 E_{1-2} 与 D_r 的关系曲线族中, 有的在 $D_r=0.5$ 有拐点, 而有的在 $D_r=0.67$ 有拐点, 有的则没有明显的拐点。从安全和应用方面考虑, 把 $D_r=0.67$ (是砂类土密实状态的下限分界点) 作为一个围岩分级界限点是比较合适的。

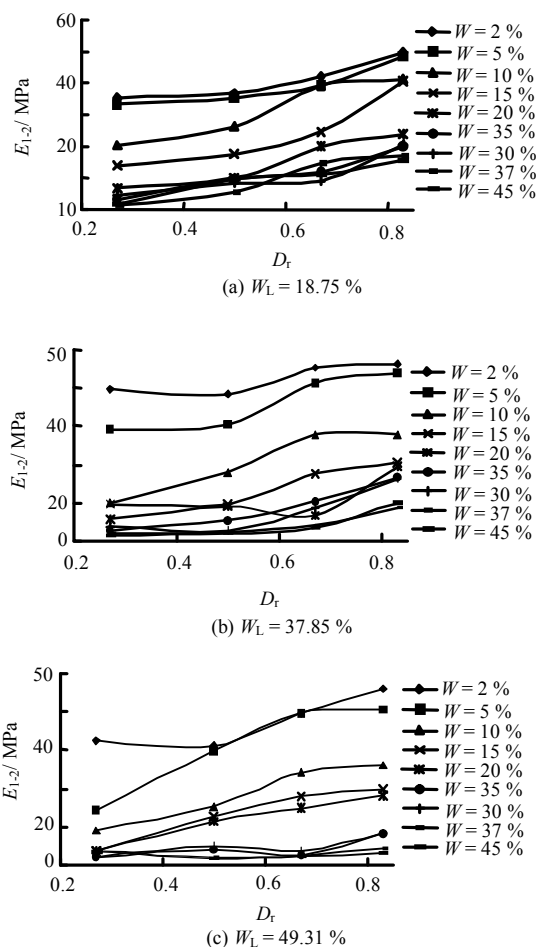


图 3 E_{1-2} 与 D_r 的关系 (W_L 不变)

Fig.3 Compression modulus E_{1-2} changing with D_r when the water content of clay W_L is fixed

从图 3 中还可以看出, W 在 20 %处为分界, 曲线族有较明显的区别: 当 $W \geq 20$ %时, 不同细粒含量所对应的曲线上分离并不明显; 而当细粒含量 $W < 20$ %后, 则各曲线上分离明显, 细粒含量越小, 则 E_{1-2} 越大。这也从另一方面说明用 $W = 20$ %作为分界点是合适的。

3.2.3 压缩模量与细粒含水率 W_L 的关系

将不同密实程度所对应的砂类土 E_{1-2} 与细粒含水率的关系曲线图 (图 4) 列出以供参考。

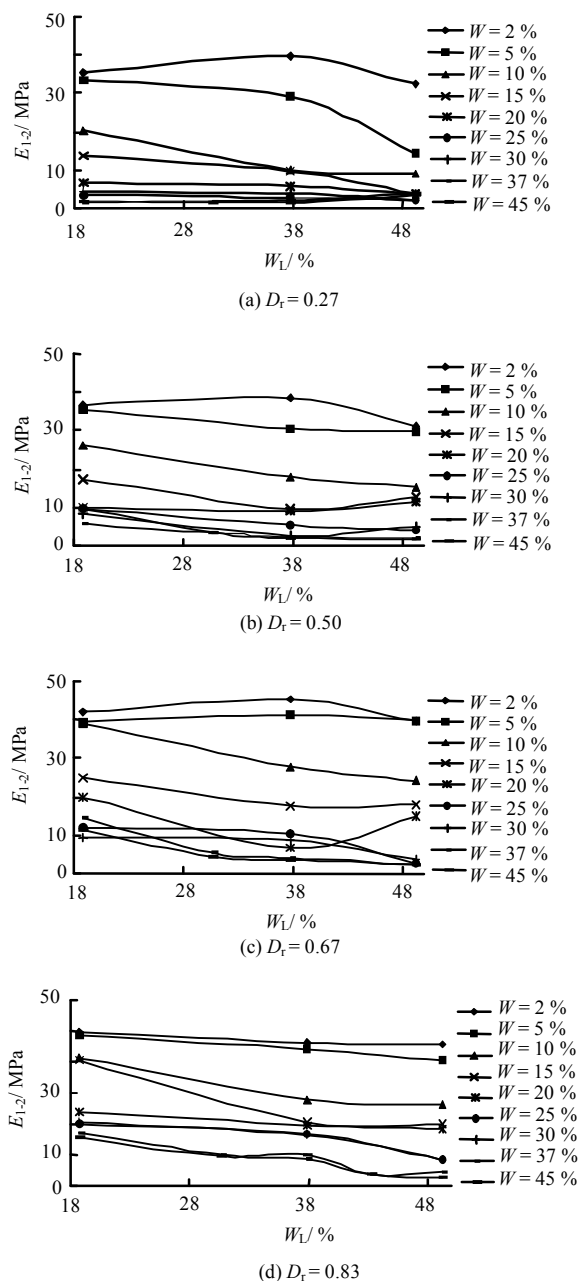


图 4 E_{1-2} 与细粒含水率 W_L 的关系 (D_r 不变)

Fig.4 Compression modulus E_{1-2} changing with water content of clay when the D_r is fixed

从图 4 可以看出, 当细粒含量较少时 (2 %和 5 %), 细粒含水率即细粒的软硬程度的变化对 E_{1-2} 影响较小。综合全图分析, 此点对应的 E_{1-2} 应是一个误差较大的点; 当砂类土处于较松散状态 ($D_r = 0.27$) 且 $W > 20$ %时, 细粒含水率对 E_{1-2} 的影响也较小; 除上述两种情况外, 细粒含水率对 E_{1-2} 的影响相对较大, 但当其他两个因素一定时, E_{1-2} 受其影响的变化范围也在 10 MPa 之内。综合 3.2.1 中分析细粒含量对 E_{1-2} 的影响规律时须考虑细粒含水率的影响, 可以认为, 细粒含水率可以作为一个修正指标, 用来评定砂类土隧道围岩的压缩模量。

3.3 分析结果

从以上的分析可以得出以下的结果:

(1) 通过统计分析,从总体上来看,对砂类土压缩模量影响程度从大到小次序为:细粒含量>相对密实度>细粒含水率。砂类土隧道围岩压缩模量与细粒含量呈负相关关系,与相对密实度呈正相关关系,与细粒含水率呈负相关关系。砂类土的细粒含量、细粒含水率及密实程度 3 个因素,对砂类土隧道围岩的压缩模量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的影响。压缩模量与三因素的关系可以用定量表达式(1)来描述。

(2) 细粒含量与砂类土压缩模量的关系呈负相关,是对 E_{1-2} 影响最大的因素。由 E_{1-2} 值的分布将细粒含量分为 3 个阶段:第 1 阶段 $W \leq 5\%$,此范围内对应的压缩模量最大;第 2 阶段 W 在 $5\% \sim 20\%$,此范围内所对应的压缩模量变化幅度较大;第 3 阶段 $W \geq 20\%$,是压缩模量随细粒含量增大而基本保持不变或变化较小的阶段。当砂类土密实程度一定时, E_{1-2} 与细粒含量的关系可以用三次和二次曲线方程来描述。

(3) 总体上 E_{1-2} 与相对密实度 D_r 呈正相关关系,但对 E_{1-2} 的影响程度与细粒含量有关。如把压缩模量的大小作为评定影响砂类土隧道围岩开挖稳定性的重要参数之一时,应当把细粒含量作为第 1 评价指标,而不是反映砂类土的密实程度指标的 D_r ;当把 D_r 作为评定砂类土隧道围岩稳定性的第 2 指标时,将 $D_r = 0.67$ 作为一个分界点是比较合适的。

(4) 当细粒含量较少时(2%和 5%)和当砂类土处于较松散状态($D_r = 0.27$)且 $W > 20\%$ 时,细粒含水率对 E_{1-2} 的影响也较小;除上述两种情况外,细粒含水率对 E_{1-2} 的影响相对较大, E_{1-2} 受其影响的变化范围在 10 MPa 之内。细粒含水率可以作为一个修正指标,用来评定砂类土体隧道围岩的压缩模量。

4 结 语

本文从影响砂类土体围岩稳定性的 3 个因素入手,探讨了细粒含量、相对密实度 D_r 及细粒含水率对砂类土压缩模量的影响规律。本研究是从砂类土体隧道围岩分级的角度出发,用能反映围岩稳定性的力学指标 c , ϕ , E_0 , ν 等作为桥梁,研究 3 个定量分级指标对以上力学指标的影响规律,通过一系列类似的试验研究,综合得出 3 个定量指标对砂类土体隧道围岩稳定性的影响规律,为采用定量指标进行围岩分级研究提供了数据基础,也使最终划分

出的类土体隧道围岩级别有了直接的对应的力学参数。本研究利用人工配制的砂类土探讨了 3 个定量指标对砂类土体隧道围岩压缩模量的影响,试验中使用的砂粒(粒径为 0.074~2 mm)经级配分析表明属于中砂,因而没有进行当所用砂粒为粗砂和细砂时的进一步研究,希望能引起广大岩土同行的注意和讨论。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部. JTG D70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 中华人民共和国水利部. GB 50218-9 工程岩体分级标准[S]. 北京:中国计划出版社,1995.
- [3] 中华人民共和国铁道部.TB 10003-2001 J117-2001 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [4] 赖琼华. 岩土变形模量取值研究[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增刊):1 750—1 754.
LAI Qiong-hua. Determination of deformation moduli for rock and soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.): 1 750—1 754.
- [5] 郑俊杰, 区剑华, 刑泰高. 参变量变分原理求土的变形模量与压缩模量间的关系[J]. 固体力学学报, 2004, 25(1): 53—57.
ZHENG Jun-jie, QU Jan-hua, XING Tai-gao. Application of the parametric variational principle to determining the relation between the moduli of soil deformation and soil compression[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 2004, 25(1): 53—57.
- [6] 梁发云. 基于多孔介质理论的地基土变形模量估算方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 147—1 150.
LIANG Fa-yun. An approach for estimating deformation modulus of subsoil based on porous medium theory [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1 147—1 150.
- [7] 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.
- [8] 中华人民共和国交通部.JTJ 051-93 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2002.
- [9] 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.
- [10] 中华人民共和国交通部.JTJ 064-98 公路工程地质勘察规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2000.
- [11] 中华人民共和国建设部. GB 50021-2001 岩土工程勘察