

文章编号: 1008—2786(2000)01—0052—05

# 无泥型软弱层带的强度参数

胡卸文

(西南交通大学土木学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 分析表明, 控制无泥型软弱层带强度参数的主要因素是其物质组成和所赋存的地质环境(地应力场)。通过现场和室内完成的大量抗剪试验结果, 从中建立出强度参数和各控制因素的关系式, 最终以控制因素的变化规律去揭示软弱层带强度参数的变化规律, 进而给出不同地段、不同类型软弱层带的强度参数值。

**关键词:** 软弱层带; 强度参数; 粒度成分; 地应力

**中图分类号:** P642.3; X141

**文献标识码:** A

软弱层带强度参数取值一直是水电、交通、铁道等工程实践中的一项重要研究内容, 也是软弱层带工程地质特性研究的核心。合理而准确的强度参数取值, 不仅对其所控制的边坡或围岩稳定性评价提供定量地质依据, 而且对相关地质工程的治理设计也具有重要的指导意义<sup>[1,2]</sup>。

就某个水电站坝区或铁道工程区而言, 尽管区内软弱夹层或层带的成因类型差别并不大, 但因它在物质组成和空间分布位置上的差异, 使其经受现代环境变化的影响程度也就不同。因此, 不仅不同部位、不同岩体单元内的软弱层带在强度上有所差异, 就是同一条夹层也会因各段所在的环境不同, 其强度就会有所区别。因而而要做好一个坝区(工程区)上百甚至数百条软弱层带的强度特性评价, 仅以逐条、逐层的试验, 来确定强度参数的方法不仅费时、费财和费力, 而且效果也不好。显然, 只有在总体上把握住控制工程区内软弱层带强度的主要因素, 同时对各类型软弱层带的特点有了深入了解, 从而建立起表征工程区内软弱层带强度参数与主控因素的关系式后, 才有可能给定不同类型、不同地段软弱层带的总体强度参数值。

本文是以某水电站坝区无泥型软弱层带强度参数取值为实例而进行的一种方法性探讨。该坝区主要出露一套玄武岩, 无大的区域性构造断裂通过, 但玄武岩岩体内发育的一套缓倾角构造错动带是构成今后水电站坝基、坝肩及地下洞室围岩稳定性的控制性边界条件之一。因此对其工程地质特性尤其是强度参数取值研究就显得极为必要。粒度分析表明, 该缓倾角错动带由粗碎屑土构成, 属典型的无泥型软弱层带。软弱层带由粗至细又可分为: 砾型、含屑砾型和岩屑砾型三类。

## 1 无泥型软弱层带强度参数的一般特点

研究表明<sup>[3]</sup>, 软弱层带强度参数也主要受其物质组成和所赋存的地质环境等因素所控制, 就粗碎屑土而言, 上述两大控制因素又可以用粒度成分和干密度  $\rho_d$  进行表征, 故在进行软弱层带的抗剪强度试验时, 均在现场测定了各项有关的物理性质指标, 以寻求夹层强度参数与物理性质指标间的关系。

对坝区不同类型软弱层带共布置了现场和室内大剪各 11 和 20 组(剪切面积均为  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ ), 它包括了砾型、含屑砾型和岩屑砾型三种类型, 所得出的峰值摩擦系数  $f_p$ 、内聚力  $C_p$  和其相应的物理性质指标(如粒度成分分维  $D$ 、含水率  $\omega$ 、干密度  $\rho_d$ 、孔隙比  $e$ )见表 1。

收稿日期: 1999—03—15; 改回日期: 1999—06—18

基金项目: 国土资源部岩土工程开放实验室基金(KF015)和西南交通大学学科建设专项基金资助

作者简介: 胡卸文(1963—), 男(汉族), 浙江金华人, 博士, 教授, 主要从事工程地质、环境地质的教学和研究。在国内外发表论文 40 多篇

表 1 坝区软弱层带抗剪强度参数及对应的物理性质指标

Table 1 The parameter of shear strength of weak interbed and corresponding physical property

| 类型               | 试样<br>编号      | 抗剪强度  |            | mm 级颗粒组成 (%) |       |      |      |        |            |        | $D$   | $\omega$<br>(%) | $\rho_d$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $e$   | 备注 |
|------------------|---------------|-------|------------|--------------|-------|------|------|--------|------------|--------|-------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|----|
|                  |               | $f_p$ | $C_p$ /MPa | 80~60        | 60~20 | 20~5 | 5~2  | 2~0.05 | 0.05~0.005 | <0.005 |       |                 |                                  |                                  |       |    |
| 砾<br>型           | PD18—1        | 0.661 | 0.025      | 0.4          | 25.2  | 51.2 | 12.0 | 10.1   | 0.97       | 0.13   | 2.181 | 2.72            | 2.405                            | 2.789                            | 0.160 | *  |
|                  | PD27—1        | 0.731 | 0.140      |              | 32.5  | 52.1 | 8.5  | 5.8    | 0.98       | 0.19   | 2.119 | 3.30            | 2.396                            | 2.835                            | 0.183 | *  |
|                  | PD21—1        | 0.783 | 0.251      | 2.5          | 40.3  | 44.7 | 7.8  | 4.0    | 0.66       | 0.04   | 1.978 | 1.62            | 2.386                            | 2.975                            | 0.247 | *  |
|                  | PD11—1        | 0.795 | 0.050      | 3.3          | 50.0  | 36.4 | 5.7  | 3.6    | 0.96       | 0.04   | 1.998 | 2.09            | 2.441                            | 2.737                            | 0.121 | *  |
|                  | PD36—1        | 0.721 | 0.070      |              | 32.0  | 49.8 | 10.2 | 7.2    | 0.62       | 0.18   | 2.141 | 4.04            | 2.445                            | 2.982                            | 0.220 | *  |
|                  | PD33—1        | 0.762 | 0.253      |              | 20.8  | 57.9 | 12.5 | 7.8    | 0.91       | 0.09   | 2.066 | 4.87            | 2.399                            | 2.966                            | 0.236 | *  |
|                  | PD53—1        | 0.806 | 0.165      |              | 38.0  | 46.3 | 9.0  | 6.2    | 0.42       | 0.08   | 2.097 | 2.54            | 2.489                            | 3.019                            | 0.213 | *  |
|                  | PD31—1        | 0.675 | 0.140      |              | 34.8  | 43.2 | 12.0 | 9.1    | 0.86       | 0.04   | 2.213 | 6.84            | 2.269                            | 2.947                            | 0.299 | *  |
|                  | $\tau_{27-4}$ | 0.631 | 0.061      |              | 20.1  | 58.9 | 12.0 | 8.0    | 0.9        | 1.1    | 2.119 | 5.26            | 2.166                            | 2.835                            | 0.309 |    |
|                  | $\tau_{11-1}$ | 0.691 | 0.102      |              | 59.4  | 32.8 | 3.2  | 4.0    | 0.56       | 0.04   | 2.090 | 4.92            | 2.246                            | 2.835                            | 0.263 |    |
| 含<br>砾<br>型      | $\tau_{45-1}$ | 0.692 | 0.142      |              | 38.0  | 46.3 | 9.0  | 6.2    | 0.5        | 0      | 2.075 | 4.12            | 2.341                            | 2.931                            | 0.252 |    |
|                  | $\tau_{2-3}$  | 0.623 | 0.136      |              | 24.5  | 50.0 | 15.0 | 10.0   | 0.42       | 0.18   | 2.158 | 5.68            | 2.174                            | 2.875                            | 0.322 |    |
|                  | $\tau_{17-2}$ | 0.571 | 0.031      |              | 38.5  | 37.3 | 12.2 | 11.2   | 0.7        | 0.1    | 2.335 | 7.13            | 2.182                            | 2.977                            | 0.364 |    |
|                  | $\tau_{6-1}$  | 0.562 | 0.103      | 0.4          | 10.5  | 45.8 | 23.2 | 22.6   | 1.27       | 0.11   | 2.323 | 9.88            | 2.100                            | 3.013                            | 0.434 |    |
|                  | $\tau_{28-1}$ | 0.560 | 0.101      |              | 16.5  | 72.3 | 7.2  | 3.6    | 0.32       | 0.08   | 2.253 | 9.37            | 2.152                            | 2.998                            | 0.393 |    |
|                  | $\tau_{2-1}$  | 0.631 | 0.532      |              | 24.0  | 47.4 | 14.5 | 12.6   | 1.3        | 0.2    | 2.312 | 4.72            | 2.208                            | 2.883                            | 0.306 |    |
|                  | PD26—1        | 0.524 | 0.100      | 0.4          | 10.5  | 45.8 | 23.2 | 18.7   | 1.29       | 0.11   | 2.323 | 8.12            | 2.177                            | 3.013                            | 0.384 | *  |
|                  | PD28—1        | 0.560 | 0.160      | 3.6          | 24.6  | 42.3 | 15.3 | 13.0   | 1.12       | 0.08   | 2.254 | 9.84            | 2.210                            | 2.767                            | 0.252 | *  |
|                  | PD12—1        | 0.601 | 0.130      |              | 14.7  | 53.9 | 15.4 | 14.6   | 1.34       | 0.06   | 2.283 | 5.83            | 2.201                            | 2.941                            | 0.366 | *  |
|                  | PD11—2        | 0.543 | 0.090      |              | 4.0   | 46.9 | 24.5 | 20.9   | 3.64       | 0.06   | 2.281 | 3.34            | 2.416                            | 2.883                            | 0.193 | *  |
| 岩<br>屑<br>砾<br>型 | PD36—2        | 0.625 | 0.180      |              | 13.1  | 42.2 | 21.0 | 20.4   | 3.24       | 0.06   | 2.338 | 6.05            | 2.341                            | 2.982                            | 0.274 | *  |
|                  | PD38—1        | 0.545 | 0.248      |              | 8.1   | 38.9 | 24.4 | 26.1   | 2.40       | 0.10   | 2.349 | 6.96            | 2.557                            | 3.061                            | 0.197 | *  |
|                  | PD9—1         | 0.514 | 0.400      |              | 16.2  | 44.1 | 21.2 | 17.0   | 1.38       | 0.12   | 2.300 | 3.48            | 2.384                            | 2.989                            | 0.254 | *  |
|                  | PD49—1        | 0.563 | 0.268      |              | 11.8  | 51.8 | 25.2 | 9.8    | 1.31       | 0.09   | 2.225 | 8.74            | 2.242                            | 3.089                            | 0.378 | *  |
|                  | PD27—2        | 0.384 | 0.001      |              | 5.9   | 36.9 | 28.5 | 26.5   | 2.10       | 0.10   | 2.324 | 10.11           | 2.028                            | 2.792                            | 0.377 | *  |
|                  | PD12—2        | 0.486 | 0.235      |              | 12.1  | 32.9 | 22.2 | 30.8   | 1.94       | 0.06   | 2.434 | 4.38            | 2.390                            | 2.878                            | 0.204 | *  |
|                  | PD7—1         | 0.554 | 0.224      |              | 3.3   | 29.3 | 27.4 | 26.2   | 3.56       | 0.24   | 2.388 | 4.88            | 2.561                            | 2.875                            | 0.123 | *  |
|                  | PD51—1        | 0.601 | 0.150      |              | 7.7   | 46.8 | 20.4 | 22.0   | 2.91       | 0.09   | 2.386 | 4.48            | 2.372                            | 2.977                            | 0.255 | *  |
|                  | $\tau_{27-4}$ | 0.421 | 0.051      |              | 18.0  | 32.2 | 20.5 | 27.1   | 2.10       | 0.10   | 2.436 | 10.68           | 1.962                            | 2.792                            | 0.423 |    |
|                  | $\tau_{5-2}$  | 0.480 | 0.502      |              | 2.6   | 71.4 | 22.2 | 26.0   | 1.28       | 0.10   | 2.413 | 7.95            | 2.040                            | 2.866                            | 0.405 |    |
|                  | $\tau_{5-2}$  | 0.422 | 0.053      |              | 2.0   | 33.0 | 27.0 | 33.4   | 4.50       | 0.10   | 2.453 | 8.32            | 2.010                            | 2.866                            | 0.426 |    |

\*有星号的行数据为室内试验结果。

分析表 1 中所列的不同类型软弱层带抗剪强度参数  $f_p$  和  $C_p$  表明有以下特点:

1. 在相近环境条件下,  $f_p$  随粒度成分不同而变化, 粒径越粗大, 对应的  $f_p$  也越大;
2. 所有软弱层带均表现出  $f_p$  随  $\rho_d$  的增大而增加, 并分别随  $e$  和  $w$  的增大而减小;
3. 由于坝区软弱层带均属粗碎屑土, 理论上颗粒之间无结构联结力, 即  $C_p=0$ , 但在天然状态下由于受较高地应力场作用而引起的围压效应, 相互之间具有较高的挤密程度, 在剪切过程中, 这些处于剪切带附近的粗颗粒在剪应力作用下, 常相互挤压错动而刻槽位移, 从而导致  $C_p$  不仅不为零, 而且均表现出一定的量值。但从 31 组剪切试验结果来看, 所得  $C_p$  值较分散, 也不具有上述的  $f_p$  变化规律。

## 2 软弱层带强度参数 $f_p$ 的粒度成分效应

已有研究成果证实<sup>[4,9]</sup>, 以粗碎屑土为特征的无泥型软弱层带粒度成分同样具有明显的分形结构特征, 表征这种分形结构的特征指标就是粒度成分的分维  $D$ 。而该分维值仅是在粒度分析结果的基础上, 通过对各位径百分含量与粒径大小进行回归分析便可获得。研究显示, 在上述三类软弱层带中, 从

砾型→含屑砾型→岩屑砾型,相应的分维表现出由小到大的变化趋势,而分维的这种变化趋势表明它作为综合反映软弱层带粒度成分的指标,更能准确地对不同类型软弱层带进行合理分类。在对不同类型软弱层带分维变化范围进行综合整理的基础上,三种类型软弱层带粒度成分的分维界限值为:①砾型:  $1.800 \leq D < 2.220$ ; ②含屑砾型:  $2.220 \leq D < 2.340$ ; ③岩屑砾型:  $2.340 \leq D < 2.600$ 。

显然,由于分维全面反映了软弱层带内各种粒径大小的组成特点,因此作为软弱层带工程分类的一个综合性定量指标,在一定程度上揭示了软弱层带物理力学性质差异的本质,也为下面用分维揭示软弱层带强度参数的粒度成分效应提供了可能。

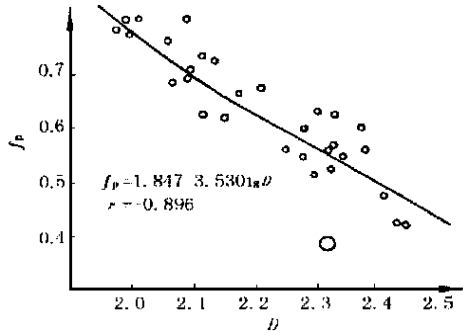


图 1 软弱层带  $D-f_p$  关系曲线  
Fig. 1  $f_p$  Curve-  $D$  of weak interbed

将表 1 中所列的  $f_p$  与  $D$  进行相关分析(图 1),可得出如下关系式

$$f_p = 1.847 - 3.530lgD, r = -0.896 \tag{1}$$

可见,  $f_p$  随  $D$  的增大而减小,两者呈负相关关系,换言之,随粒径减小,相应的  $f_p$  也减小。显然,根据上述相关式,结合不同类型软弱层带的  $D$  值,即可得出相应的强度参数变化值,见表 2。

### 3 软弱层带强度参数 $f_p$ 的围压效应

无泥型软弱层带抗剪强度参数( $f_p$  和  $C_p$ )除与带内粒度成分有关外,很大程度上还与其密实程度有关,而软弱层带物质组成的密实性又与其受的围限应力(地应力场)密不可分<sup>[6~8]</sup>。反映土体密实程度的特征指标当属干密度  $\rho_d$  或孔隙比  $e$ ,因此探讨由地应力作用对软弱层带强度参数  $f_p$  形成的围压效应,可从  $f_p$  与  $\rho_d$  或  $e$  的相互关系进行剖析,在相同地质条件下,再根据  $\rho_d$  或  $e$  与围限压力  $\sigma_N$  的相关式,可建立  $f_p$  与  $\sigma_N$  的相关方程。

对表 1 中所列的  $f_p$  与  $\rho_d$  及  $e$  作统计分析(图 2、3),可得出如下相关式

$$f_p = -0.652 + 3.652lg\rho_d, r = 0.907 \tag{2}$$

$$f_p = 0.289 - 0.653lge, r = -0.802 \tag{3}$$

针对表 1 所列三种类型软弱层带,为了尽量消除因不同粒度成分(即不同类型)带来的影响,我们试图分别按每一类型(相近粒度成分)软弱层带作出  $f_p$  与  $\rho_d$  或  $e$  的相关式,但由于样本数有限,所建各类型相关式相关程度一般(相关系数在 0.785~0.880)。如砾型:  $f_p = -0.234 + 2.561lg\rho_d, r = 0.820$ ; 含屑砾型:  $f_p = 0.408 + 2.829lg\rho_d, r = 0.864$  等。因此为了克服每一类型因样本少而影响结果的可靠性,本次研究将三种类型合并而作出了(2)、(3)关系式。从关系式也可看出,  $f_p$  随  $\rho_d$  的增高而增大,而随  $e$  的增加而减小。

### 4 无泥型软弱层带强度参数综合取值研究

前面按影响无泥型软弱层带强度参数的主控因素——粒度成分和赋存地应力环境,分别建立了  $f_p$

与反映粒度成分特点的分维  $D$  和地应力场特征的干密度  $\rho_d$  关系式, 对该类软弱层带(尤其是对那些难于取样试验部位)强度参数取值, 具明显的简便性和实用性。但不可否认, 无泥型软弱层带强度参数的大小应是粒度成分(分维)和赋予地应力环境(围压)共同作用的结果, 若只是按某一控制因素建立出的关系式并进行取值, 显然是不全面、也是不合理的, 因此有必要建立  $f_p$  与  $D$  和  $\rho_d$  的综合关系式, 才能获取合理、可信的强度参数值。

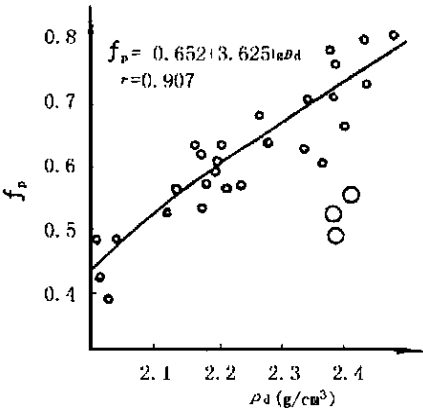


图 2 软弱层带  $f_p-\rho_d$  关系曲线  
Fig. 2 Curve  $f_p-\rho_d$  of weak interbed

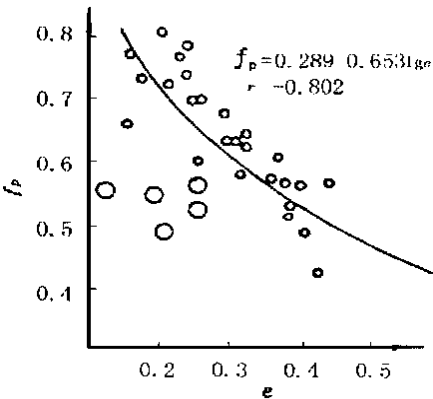


图 3 软弱层带  $f_p-e$  关系曲线  
Fig. 3 Curve  $f_p-e$  of weak interbed

仍以表 1 数据为样本, 对  $f_p$  与  $D$  和  $\rho_d$  作二元线性回归, 得到如下方程

$$f_p = 1.5280 - 0.6237D + 0.2090\rho_d \quad r = 0.910 \tag{4}$$

同时, 根据土的饱和含水率  $\omega_s = \frac{e}{\rho_s} \times 100\%$  及  $\rho_d = \frac{\rho_s}{1+e}$ , 即  $\rho_d = \frac{\rho_s}{1+\omega_s\rho_s}$  代入(4)式, 还可得出软弱层带  $f_p$  与饱和含水率  $\omega_s$  (指非膨胀条件下, 土体饱和时的含水率)和分维  $D$  的关系式

$$f_p = 1.5280 - 0.6237D + 0.2090 \left[ \frac{\rho_s}{1 + \omega_s \rho_s} \right] \tag{4}$$

显然, 根据(4)式, 只要已知坝区任一部位的粒度成分分维  $D$  和  $\rho_d$  即可获得相应的强度参数  $f_p$ ; 而据(5)式, 又可以预测坝区任一软弱层带处于饱水状态时的摩擦系数, 这也将对位于河床下部和其他难于进行试验的夹层在饱水状态下的强度参数取值带来了方便。

5 结 论

- 1. 大量的现场和室内试验资料表明, 无泥型软弱层带强度参数  $f_p$  是内、外各种因素共同作用的结果, 尤其是其粒度成分和所赋存的地应力环境。
- 2. 根据分形理论得出的粒度成分分维  $D$ , 由于它全面反映软弱层带的粒度成分特点, 因此对揭示粒度成分对软弱层带强度参数  $f_p$  的控制作用具有重要的实用意义。
- 3. 根据某水电工程区大量实验资料得出的软弱层带强度参数  $f_p$  与  $D$  和  $\rho_d$  的关系式, 不仅对于其大坝河床底部和其他难于进行试验的夹层进行强度预测, 具有实用性, 所得参数可靠度高, 而且这种取值方法对类似工程区如铁道、交通等相关参数的选取也有普遍的指导意义。

参考文献:

[1] 曲永新. 软弱夹层的工程地质预报[J]. 工程地质学研究, 北京: 地质出版社, 1985, 127~135  
1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w

- [2] 梅剑云, 付冰骏. 中国岩石力学的发展与现状[J]. 岩土力学与工程学报, 1983, 2(1): 1~6
- [3] 胡卸文. 无泥型软弱层带物理性质的围压效应[J]. 山地学报(原《山地研究》), 1999, 17(1): 86~90
- [4] 胡卸文, 宋跃. 裂隙性粘土粒度成分的分形结构特征[J]. 山地研究(现《山地学报》), 1997, 16(4): 52~57
- [5] Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature[M]. San Francisco, USA, 1982: 107~125
- [6] 张咸恭, 聂德新. 围压效应与软弱夹层泥化可能性分析[J]. 地质论评, 1990, 6(2): 114~119
- [7] 张兴仁. 围压效应在工程地质研究中的意义[J]. 四川水力发电, 1990, 2(2): 21~26.
- [8] Brown, E. T. and Hoek, E. . Trends in relationships between measured in-situ stress and depth[J]. *Int. J. of Rock Mech. and Min. Sci.* 1978, 15(4): 7278
- [9] 胡卸文. 金沙江溪洛渡水电站坝区软弱层带的系统工程地质研究[D]. 成都理工学院博士学位论文, 1996: 38~44

## SHEAR STRENGTH PARAMETER OF NO-CLAY WEAK INTERBED

HU Xie-wen

(Dep. of Environmental Science and Geotechnique, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**Abstract:** Shear strength parameter of weak interbed is not only an important subject for hydroelectric, traffic and railroad project designing and construction, but also a key problem for engineering geological property study of weak interbed. Rational and correct strength parameter valuing not only provide quantitative geological foundation to slope or surrounding rockmass stability analysis controlled by weak interbed, but also guide strengthening designation of correlative geological engineering. Through analysing, main factors to control shear strength parameter  $f_p$  of no-clay weak interbed are its granulometric composition and existed geological environment geostress. Based on a lot of shear strength testing results, we establish the correlative equation between shear strength parameter  $f_p$  different controlling factors, for example granulometric composition dimension  $D$  and dry density  $\rho_d$ , and reveal the parameter's changing rule. We finally obtain the valuing method of shear strength parameter  $f_p$  of no-clay weak interbed existed different type and region. Obviously this correlative equation between  $f_p$  and  $D$  or  $\rho_d$  may predict the parameter  $f_p$  of weak interbed existed region where  $f_p$  is difficult to measure. Simultaneously, this valuing method also has guiding significance to similar traffic and railroad engineering region.

**Key words:** Weak interbed, shear strength parameter, granulometric composition, geostress