

# 地应力作用下软弱层带的工程特性研究

## Study on engineering properties of weak layers under ground stresses

符文熹<sup>1</sup>, 聂德新<sup>2</sup>, 尚岳全<sup>1</sup>, 陈云敏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 土木工程学系, 浙江 杭州 310027; 2. 成都理工大学 工程地质研究所, 四川 成都 610059)

**摘要:** 分析了勘探平洞中软弱层带取样试验存在的问题, 研究了软弱层带受开挖松弛的影响, 并采用了一种有效控制开挖松弛的取样办法, 使软弱层带试验成果能反映天然地应力下的工程特性。以金沙江某水电站坝址软弱夹层为例, 研究了地应力与软弱层带物理力学参数的关系, 揭示了地应力是控制软弱层带工程特性最活跃的因素, 这对岩体工程的建设与稳定性分析有指导意义。

**关键词:** 软弱层带; 地应力; 工程特性; 干密度; 孔隙比; 摩擦系数

**中图分类号:** TV 223.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2002)05-0584-04

**作者简介:** 符文熹(1972-), 男, 四川渠县人, 浙江大学土木工程学系博士后, 主要从事岩土体的工程特性和岩体稳定研究。

FU Wen-xi<sup>1</sup>, NIE De-xin<sup>2</sup>, SHANG Yue-quan<sup>1</sup>, CHEN Yun-min<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Institute of Engineering Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The problems existing in the present sampling method for weak layers in exploratory adits, are discussed in this paper. Because the weak layers are easily affected by the relaxation after the excavation of exploratory adits, the test results of samples taken from exploratory adits cannot reflect the engineering properties of weak layers under natural ground stress. But the stress relaxation effect on weak layers can be avoided effectively if a special sampling method in exploratory adits is adopted. Taking the intercalations of a certain dam site in Jinshajiang River as an example, the correlations between physical and mechanical indices and confining pressure indicate that ground stress is the most important environmental factor, which controls the engineering properties of weak layers. The confining pressure effect on weak layers has a realistic significance for the construction and stability assessment of rock mass projects too.

**Key words:** weak layer; confining pressure; dry density; porosity ratio; friction coefficient

## 1 前言\*

位于地壳中的软弱层带(如软弱夹层、断层等), 因其物理力学性质远较周围岩体差<sup>[1~6]</sup>, 常常是控制岩体稳定性的重要边界<sup>[6~10]</sup>。而软弱层带赋存于复杂的地质环境中, 它的工程特性是其物质基础与环境条件共同作用的结果<sup>[3,5~17]</sup>。软弱层带的物质基础主要指颗粒组成、矿物成分和化学成分等。环境条件主要有地应力、地下水和地温等。而地应力却是最活跃的因素, 它不仅对软弱层带的工程特性起决定作用, 而且对另外两个因素也有一定的影响(尤其是对地下水)。研究发现<sup>[8]</sup>: 当最大主应力垂直结构面时, 结构面闭合, 裂隙水渗流减弱; 当最大主应力平行结构面时, 结构面张开, 裂隙水渗流增强。

在软弱层带形成后的地质历史中, 天然地应力一方面使其逐渐发生压密和固结, 另一方面还延缓地下水的渗流, 从而改善其物理力学性质。但目前研究中常常忽视地应力对其工程特性的改善作用, 过多地强调地下水对软弱层带的泥化作用<sup>[17]</sup>, 结果降低了软弱层带的可利用程度和提高了工程造价。因此, 研究软弱层带的工程特性应从软弱层带的物质组成和环境条件两方面来考虑。

本文以金沙江某水电站坝址区软弱夹层为研究对象, 来揭示地应力作用下软弱层带工程特性的变化规律, 为合理评价其物理力学参数起到抛砖引玉作用。

## 2 软弱层带现场取样研究

当前获取软弱层带“原状”试样常在勘探平洞中进行。为了尽可能获取天然地应力下的试样, 必须注意平洞开挖的影响。由于开挖后岩体初始地应力释放、洞壁岩体回弹, 形成松动圈, 导致其中的夹泥物质迅速吸收空气中的水分并加剧地下水渗流。相应地, 其含水率、孔隙比和干密度等随之变化。为了说明开挖松弛的影响, 沿不同深度取样测试的物理指标见表1所示, 可以看出, 随取样深度增大, 含水率逐渐减低, 干密度逐渐增大, 孔隙比逐渐减小; 而当取样达到一定深度后, 其物理指标便趋于稳定。显然, 取样达到一定深度后才可以反映其在天然地应力下的物理性质。

另外, 取样时也需要避免对软弱层带的人为扰动。Müller(1967)曾指出, 沉积物一旦达到一定的积土负载, 被压实的过程是不可逆的。基于这一观点, 采取特

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49672166, 40072090)

收稿日期: 2002-03-08

表 1 软弱层带的物理指标随洞壁径向深度的变化

| Table 1 The physical indices of a weak layer varying with depth ( $L$ ) from wall of an exploratory adit in the radial direction |         |                            |                              |      |       |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------|------------------------------|------|-------|-----------|-----------|
| 距离 $L$ / cm                                                                                                                      | $w$ / % | $\rho / (g \cdot cm^{-3})$ | $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$ | $G$  | $e$   | $w_p$ / % | $w_L$ / % |
| 0                                                                                                                                | 17.89   | 1.830                      | 1.552                        | 2.78 | 0.791 | 16.10     | 27.30     |
| 10                                                                                                                               | 15.31   | 1.964                      | 1.703                        | 2.78 | 0.632 | 16.87     | 29.29     |
| 40                                                                                                                               | 9.01    | 2.310                      | 2.119                        | 2.78 | 0.319 | 16.48     | 29.01     |
| 70                                                                                                                               | 8.15    | 2.321                      | 2.146                        | 2.78 | 0.295 | 16.48     | 29.01     |
| 90                                                                                                                               | 7.71    | 2.325                      | 2.158                        | 2.78 | 0.288 | 16.80     | 29.10     |
| 100                                                                                                                              | 7.58    | 2.341                      | 2.176                        | 2.78 | 0.277 | 16.80     | 29.10     |

殊的取样方法可以使软弱层带的扰动降低到最小。如图 1 所示,为了减少爆破影响,在炸去软弱层带上覆岩石时先预留一定厚度的围岩,该部分岩石由人工剥去,然后迅速切取试样并在现场快速蜡封。

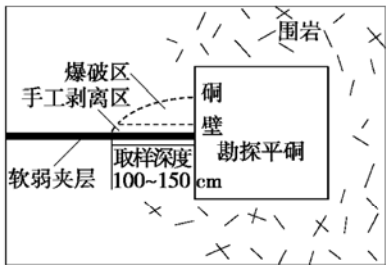


图 1 平硐软弱层带取样示意图

Fig. 1 Sampling a weak layer in an adit

取样过程中软弱层带围岩松弛的时间效应也必须注意。为了证明此效应,分两阶段对软弱夹层进行取样。第 1 天最大取样深度为 80 cm 处,24 h 后,取样范围从 80~ 140 cm 处,见图 2 所示。图 2 的试验成果反映了一天之内含水率的变化。这表明即使取样深度到原岩位置,由于开挖暴露,原岩应力松弛的时间效应对软弱层带工程特性也会有显著的恶化作用。

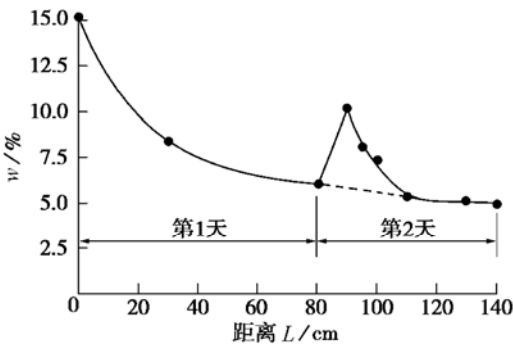


图 2 软弱层带的夹泥物质的含水率在不同取样阶段的变化

Fig. 2 The variation of water content in a weak layer in two stages

3 软弱层带的应力分析

从广义角度看,对一定介质而言,作用于介质周围的压应力都可以视为围压。但目前围压的具体含义却随研究对象的不同而异。如室内三轴试验中,围压一般指侧向压力,而垂向压力却被称为径向压力。就软

弱层带而言,其空间延伸方向是自身,而垂直其延伸方向则是它的围岩。因此,可以用软弱层带的法向压应力(即文中所指的围压)  $\sigma_N$  来反映其受到的地应力。

如果已知一点的应力状态,则可用弹性力学理论导出该点任一斜截面上的正应力  $\sigma_N$  为

$$\sigma_N = n_i n_j \sigma_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3)$$

式中  $n_i, n_j$  为方向余弦;  $\sigma_{ij}$  为应力分量。

通常,主应力方向并不是所选的坐标系方向,如果主应力方向与所选坐标系一致,则式(1)可简化为

$$\sigma_N = n_i n_i \sigma_{ii} \quad (i = 1, 2, 3)$$

即 
$$\sigma_N = n_1^2 \sigma_1 + n_2^2 \sigma_2 + n_3^2 \sigma_3$$

式中  $n_i$  为斜截面法线对应于主应力方向的方向余弦。

式(3)也可写为

$$\sigma_N = \sigma_1 \cos^2 \theta_1 + \sigma_2 \cos^2 \theta_2 + \sigma_3 \cos^2 \theta_3$$

$\cos \theta_i$  可用下式求得:

$$\cos \theta_i = \frac{1 - [\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta_i - 2 \cos \alpha \cos \beta_i \cos \gamma_i + (\sin \beta_i - \sin \alpha)^2] / 2}{2}$$

式中  $\theta_i$  为结构面法线与某主应力的夹角;  $\alpha$  为结构面法线倾伏角;  $\beta_i$  为某主应力方向倾伏角;  $\gamma_i$  为某主应力方位角与结构面法向方位角之差。

对于平面问题,式(4)和式(5)可简化为

$$\sigma_N = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta$$

$$\cos \theta = \cos(\alpha - \beta)$$

式中  $\theta$  为结构面法线与第一主应力的夹角;  $\alpha$  为结构面法线倾伏角;  $\beta$  为第一主应力方向倾伏角。

软弱层带的主应力可以通过有限元等计算获得。计算获得坝址软弱层带天然条件下的围压见表 2。

4 地应力对软弱层带物理性质的影响

干密度、孔隙比和含水率等可以表征软弱层带物理性质的好坏。受地应力作用软弱层带发生压缩变形,其含水率、干密度和孔隙比随之发生变化,这既与地应力大小有关,也与黏粒含量、矿物成分等有关。但对于成因相同、黏土矿物成分一致、黏粒含量变化不大的软弱层带而言,在受到不同地应力作用时,干密度和孔隙比等必然与之有一定的对应关系。为了获得天然

条件下软弱层带的基本物理指标与对应地应力的关系,选取平洞中基本不受洞壁围岩松动圈影响的夹泥试样的干密度和孔隙比来与它们的围压进行分析(见表2)。

表2 某坝址软弱层带夹泥物质物理指标与围压和埋深关系  
Table 2 Confining pressure, over burden thickness and physical indices of weak intercalations in a certain dam site

| 软弱层带编号   | $H$<br>/m | $\sigma_N$<br>/100 kPa | $\rho_d$<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | $e$   | $w$<br>/% | $w_s$<br>/% |
|----------|-----------|------------------------|------------------------------------|-------|-----------|-------------|
| PD34-36  | 58.7      | 15.35                  | 2.026                              | 0.362 | 9.50      | 13.10       |
| PD35-38  | 50.5      | 13.35                  | 1.981                              | 0.430 | 15.10     | 14.40       |
| PD34-64  | 83.1      | 21.25                  | 2.171                              | 0.259 | 10.10     | 12.00       |
| PD37-112 | 64.0      | 22.64                  | 2.176                              | 0.277 | 7.58      | 9.96        |
| PD37-120 | 70.0      | 23.71                  | 2.212                              | 0.248 | 5.81      | 8.98        |
| PD39-20  | 40.0      | 18.34                  | 2.145                              | 0.287 | 7.68      | 10.40       |
| PD25-94  | 102.4     | 29.50                  | 2.259                              | 0.231 | 5.71      | 8.31        |

$w_s$  为饱和含水率。

将表2中的干密度和孔隙比与对应的围压进行相关分析(见图3),得

$$\rho_d = 0.361 \ln \sigma_N + 1.058 \quad (r = 0.957) \quad (8)$$

$$e = 1.040 - 0.247 \ln \sigma_N \quad (r = 0.940) \quad (9)$$

式中  $\sigma_N$  为围压(100 kPa);  $\rho_d$  为干密度(g/cm<sup>3</sup>);  $e$  为孔隙比。

式(8)表明软弱层带夹泥物质的干密度与其所受的围压有很好的对数关系,表明围压对干密度起控制作用。式(9)表明随围压增高,夹泥物质孔隙比逐渐减小,这与室内土工压缩试验获得的压力与孔隙比的关系是一致的。不同的是,天然条件下围压对夹泥物质的压密时间很长,使其得到充分的压密和固结。

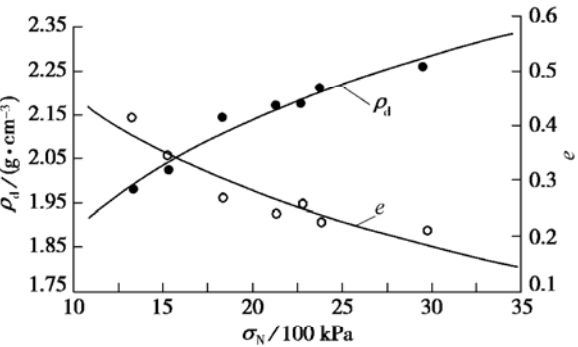


图3 软弱层带夹泥的干密度  $\rho_d$  和孔隙比  $e$  与围压的关系  
Fig.3 The correlation between dry density, porosity ratio and confining pressure  $\sigma_N$  of the argillaceous materials in weak layer

5 地应力对软弱层带强度的影响

从物质分布看,软弱层带的夹泥物质大多分布在与围岩接触的界面处且连续性好,这些连续分布的夹泥物质是软弱层带强度最低的部分,因此,工程上关心的重点是其中的夹泥物质的强度。对于成因相同、矿物成分一致、黏粒含量变化不大的软弱层带而言,影响其强度的主要物理指标就是干密度和孔隙比等。前面

的分析还表明干密度和孔隙比与地应力大小有关,因此,地应力是间接控制软弱层带强度的主要因素之一。

5.1 软弱层带强度参数与物理指标关系

在平洞中,沿洞壁径向深度方向取原状剪切样进行直剪试验。试验表明,夹泥物质的摩擦系数也随深度逐渐增大,并到一定深度趋于稳定(见表3,  $f$  为摩擦系数)。因此,当取样深度较大且受松动圈影响较小的夹泥物质,其抗剪强度较高,能够代表在该处天然条件下的强度。鉴于大量获得这种深度的试样花费很大,为了获得不同含水率、干密度下夹泥物质的强度,也对沿洞壁径向不同深度的夹泥试样进行了研究。

表3 软弱层带的夹泥物质的强度试验成果  
Table 3 Results of direct shear test of the argillaceous materials in weak intercalations in a certain dam site

| 软弱层带编号   | $L$<br>/cm | $w$<br>/% | $w_s$<br>/% | $\rho_d$<br>/(g·cm <sup>-3</sup> ) | $f$   | $c$<br>/100 kPa |
|----------|------------|-----------|-------------|------------------------------------|-------|-----------------|
| PD35-38  | 10~20      | 18.38     | 19.95       | 1.734                              | 0.431 | 0.266           |
|          | 55~60      | 16.65     | 21.40       | 1.739                              | 0.440 | 0.279           |
|          | 65~70      | 16.23     | 17.01       | 1.883                              | 0.494 | 0.344           |
|          | 100        | 15.06     | 14.36       | 1.981                              | 0.538 | 0.200           |
| PD34-64  | 0~10       | 21.90     | 28.10       | 1.550                              | 0.250 | 0.363           |
|          | 40~70      | 15.60     | 15.80       | 1.946                              | 0.535 | 0.483           |
|          | 100        | 10.10     | 12.00       | 2.071                              | 0.550 | 0.230           |
| PD37-112 | 20         | 15.31     | 22.70       | 1.703                              | 0.383 | 0.566           |
|          | 40         | 9.00      | 11.22       | 2.119                              | 0.545 | 0.620           |
|          | 100        | 7.58      | 9.96        | 2.176                              | 0.561 | 0.648           |
| PD37-120 | 0          | 20.10     | 25.30       | 1.623                              | 0.278 | 0.480           |
|          | 10         | 19.70     | 24.20       | 1.653                              | 0.321 | 0.543           |
|          | 30         | 8.70      | 10.20       | 2.152                              | 0.620 | 0.205           |
|          | 70         | 6.30      | 8.90        | 2.215                              | 0.638 | 0.504           |
|          | 90~105     | 8.10      | 10.17       | 2.155                              | 0.577 | 0.370           |
| PD39-20  | 80~110     | 7.68      | 10.40       | 2.145                              | 0.577 | 0.340           |
|          | 110        | 7.14      | 9.30        | 2.195                              | 0.561 | 0.480           |

虽然各处软弱层带的饱水程度有一定差异,但干密度对夹泥物质强度的影响,主要表现在抗剪时颗粒间的接触类型和接触面积。对于干密度相近且颗粒组成基本相同的夹泥物质,抗剪时颗粒间的接触面积大致相等。因此,只要夹泥物质的含水率差别不大,则夹泥物质的摩擦系数与干密度就会有对应的关系。

夹泥物质的黏聚力反映了结构内部的黏结强度,理论上应与表征结构强度的干密度和孔隙比有较好的关系。当获取的试样中含有少量粗颗粒,且粗颗粒在剪切时恰处于剪切面时,会导致强度变化较大。因此,数量有限的直剪试验,通常很难建立它们的关系。鉴于岩体工程稳定分析中多取黏聚力为0以作为安全储备,在此仅研究夹泥物质的摩擦系数与干密度的相关性。将表3中的干密度和摩擦系数的关系绘于图4

中,并进行相关分析获得如下关系:

$$f = 0.939 \ln \rho_d - 0.13 \quad (r = 0.917) \quad (10)$$

取软弱层带夹泥的平均比重  $G = 2.78$ , 并将  $\rho_d = (G\rho_w)/(1+e)$  (通常取  $\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$ ) 带入上式得摩擦系数与孔隙比的关系为

$$f = 0.830 - 0.939 \ln(1+e) \quad (11)$$

类似地,利用  $w_s = 100e/G$ , 得  $e = w_s G/100$  ( $G = 2.78$ ), 并带入式(11)得饱和含水率与摩擦系数的关系为

$$f = 0.830 - 0.939 \ln(1 + 0.0278w_s) \quad (12)$$

用式(12)可以预测软弱层带未来水库蓄水后处于饱水状态时的摩擦系数。

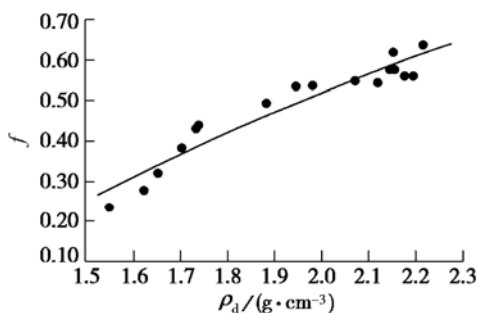


图4 软弱层带夹泥物质的  $\rho_d$  与  $f$  关系

Fig. 4 The correlation between  $\rho_d$  and  $f$  of the argillaceous materials in weak layer

## 5.2 软弱层带强度参数与地应力关系

本文研究的软弱层带基本位于弱风化下限、微风化和新鲜岩体中,而位于这些部位岩体中的软弱层带因围压一般比吸水后的膨胀力高,软弱层带即使吸收水分,但其天然孔隙比和干密度是很少变化的。在获得夹泥物质的摩擦系数与干密度间的关系后,结合式(8)和(10)就可以导出围压与摩擦系数的关系:

$$f = 0.939 \ln(0.36 \ln \sigma_n + 1.058) - 0.130 \quad (13)$$

运用式(13)可以推测位于某一深度软弱层带的抗剪强度,这对于目前尚未勘探的软弱夹层和河床以下虽已勘探发现但难以获得原状样进行强度试验的软弱层带的强度参数的评价有现实指导意义。对于开挖工程,因地应力环境的改变,只要获得开挖后夹泥物质的围压,其强度的获得也是很方便的。

## 6 结 语

上述分析证明软弱层带的工程特性与地应力密切相关。如果忽略环境条件(尤其是地应力),则对它们的工程特性评价是不完善的,且会导致物理力学参数试验值远远低于天然状态下的值,这将降低软弱层带的利用性和提高工程造价。

## 参考文献:

- [1] Müller G. Diagenesis in argillaceous sediments[A]. Larsen G, Chillingar G V. Diagenesis in Sediments[C]. Amsterdam: Elsevier, 1967. 127- 177.
- [2] Morgenstern N R, Eigenbrod K D. Classification of argillaceous soils and rocks[J]. J Geotechnical Eng Div, ASCE, 1974, **100** (10): 1137- 1156.
- [3] Hoshino K. Mechanism of lithification and cementation of the rocks, and its strength[A]. Proc 7th Symp Rock Mechanics[C]. Rotterdam: A A Balkema, 1987. 1- 6.
- [4] Meigh A C, Wolski W. Design parameters for weak rocks[A]. Proc 7th Eur Cong Soil Mech[C]. Rotterdam: A A Balkema, 1980. 315- 321.
- [5] 聂德新, 张咸恭, 韩文峰. 坝基岩体抗滑稳定分析中软弱层带抗剪参数偏低的主要原因分析[A]. 第三届全国工程地质大会论文集[C]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988. 322- 337.
- [6] Zhang X G, Han W F, Nie D X. Engineering geological classification of fault rocks[A]. Proc 5th Inter Cong IAEG[C]. Rotterdam: A A Balkema, 1986. 479- 486.
- [7] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰. 软弱夹层围压效应和泥化可能性分析[J]. 地质论评, 1990, **6**(2): 114- 119.
- [8] 聂德新, 张咸恭, 韩文峰. 软弱层带工程地质评价中的几个问题[A]. 第四届全国工程地质大会论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1992. 603- 609.
- [9] 聂德新, 符文熹, 任光明, 等. 天然围压下软弱层带的工程特性及当前研究中存在的问题分析[J]. 工程地质学报, 1999, **7**(4): 298- 302.
- [10] 任光明, 聂德新. 软弱层带夹泥物理力学特征的仿真研究[J]. 工程地质学报, 1999, **7**(1): 65- 61.
- [11] Chilingar G V, Knight L. Relationship between pressure and moisture content of kaolinite, illite, and montmorillonite clays[J]. Bull Am Assoc Pet Geologists, 1960, **44**: 101- 106.
- [12] Chilingar G V, Rieke III H H, Robertson Jr J O. Relationship between high pressure and moisture content of halloysite and dickite clays[J]. Geol Soc Am Bull, 1963, **74**(8): 1041- 1048.
- [13] Heberg H D. Gravitational compaction of clays and shales[J]. Amer Jour Sci, 1963, **31**: 241- 287.
- [14] Hoshino K, Inami K. Stages of compaction as defined from change of mechanical properties[J]. Jour Jap Ass Petrol Tec, 1977, **40**: 166- 173.
- [15] Hoshino K. Effect of geological factors on mechanical properties of rocks[A]. Proc 6th Symp Rock Mechanics[C]. Japan, 1984. 145- 150.
- [16] Rieke H H. Compaction of argillaceous sediments[D]. Los Angeles: University of Southern California, 1970.
- [17] Skempton A W. The consolidation of clays by gravitational compaction[J]. Q J Geol Soc Lond, 1970, **125**(3): 373- 411.