

无泥型软弱层带物理性质的围压效应^{*}

胡 卸 文

(西南交通大学土木工程学院 成都 610031)

提 要 通过对处于围压状态下无泥型软弱层带物理性质现场试验结果及其所赋存的应力场分析,并结合同类型扰动试样室内围限(固结)试验结果,表明围压(限)作用对无泥型软弱层带物理性质的控制作用,如同含泥型夹层,也是极为显著的。

关键词 软弱层带 物理性质 围压效应

分类号 《中图法》P642, TU43, TU45

在研究软弱层带物理性质时,只有从其成分结构特征和地应力等环境条件两大方面结合考虑,才能了解其天然条件下的真实状态^[1]。

纵观以往对含泥型软弱夹层研究^[2~3],普遍忽视了地应力对其物理性质的控制作用,而过多地强调地下水的影响,致使泥化夹层扩大,强度参数取值偏低,结果降低了与软弱夹层相关岩体的可利用程度,提高了工程造价^[4]。调查表明,真正处于深部高围压下的含泥型软弱夹层是很少泥化的,相反泥化夹层往往是强卸荷带中的软弱夹层^[5]。

显然,开展对无泥型软弱层带物理性质的围压效应研究不仅可深化软弱夹层的理论与实践,且对揭示含不同粒度成分软弱层带的围压作用程度,对该类型软弱层带物理力学参数的合理选取以及相关围岩岩体可利用程度的判别等,都具有重要的意义。下面以我国某大型水电站坝区无泥型软弱层带为研究实例,探讨围压对其物理性质的控制作用。

1 无泥型软弱层带物理性质与相应围压关系

某大型水电站坝区以一套玄武岩为主,地层产状平缓,构造破坏微弱,除局部发育小断层外,主要为发育于岩层层间和层内的构造错动带和裂隙。通过对未受卸荷影响的层间、层内错动带(即软弱层带)粒度成分分析表明,其带中粘粒含量($< 0.005\text{mm}$)均 $< 0.5\%$,而 $> 0.1\text{mm}$ 的颗粒含量均 $> 90\%$,可见层带物质组成均属粗碎屑土。同时根据各软弱层带不同的粒度组成,又大致可分为三种类型:岩屑砾型、含屑砾型和砾型。

1.1 软弱层带面上的压应力分析

从围压定义上看,对一定的介质而言,作用于介质周围的力都应称之为围压。目前围压的含义在岩土体三轴试验中,一般指侧向压力,垂向压力不叫围压而称为轴向压力或正应力。就软弱层带而言,其延伸方向只是其自身,而垂直其延伸方向则是它的围岩,因此按围压及轴向应力(正应力)的定义,此时围压应是平行于软弱层带的延伸方向,而正应力则应是垂直于软弱层带面上的压应力,即沿结构面法线方向的压应力(σ_N)。

如前所述,软弱层带物理性质除与其成分结构有关外,还与所受围限压力有关,而此处的围限应力

^{*}西南交通大学学科专项基金与国土资源部岩土工程开放研究实验基金资助项目。

收稿日期:1998-06-09;改回日期:1998-07-24。

显然包括上述的侧向应力(围压)和轴向应力(压应力 σ_N)。在一般情况下,软弱层带的压密程度除与侧向应力有关外,又更主要受控于轴向应力。因此,为了将复杂问题简单化,下面探讨软弱层带物理性质的围压效应,主要是指软弱层带面上所受轴向应力(压应力 σ_N)对物理性质的作用效果。

关于软弱层带面上压应力 σ_N 的求解,最基本的是在研究区地应力实测结果基础上,通过对研究区地应力场的平面有限元分析,获取每一条软弱层带某一部位的最大、最小主应力 σ_1 和 σ_3 。然后根据弹性力学理论,在已知某一点的 σ_1 、 σ_3 后,即可通过推算求得过该点经任一斜截面上的压应力值^[4]。

1.2 压应力对软弱层带物理性质的影响

代表软弱层带物理性质的特征指标当属干密度 ρ_d 和孔隙比 e , 这些指标值的高低表征了软弱层带物理性质的好坏。软弱层带中的组成物质在受到围压作用而发生压密时,不仅与所受应力值的大小有关,而且与组成物质的粒度成分有关。显然在相同围压作用下,颗粒细小的岩屑砾型要比较粗大的砾型压得更密实些。因此只有在相同类型粒度成分下,这些无泥型软弱层带在受到压应力 σ_N 作用时,其 e 、 ρ_d 的高低才与 σ_N 具有一定的相关性。为获得这种关系,对研究区不受卸荷松弛影响的 20 条软弱层带,在现场进行了物理性质(如天然密度 ρ 、含水率 ω 、土粒密度 ρ_s 和饱和度 S_r 等)测试,同时对这 20 条软弱层带取样部位的应力状态,通过有限元模拟分析并按软弱层带倾角进行计算,获得面上的 σ_N 见表 1。

1.2.1 软弱层带 ρ_d - σ_N 关系

将表 1 中三种不同类型物质组成的软弱层带的 ρ_d 与对应的 σ_N 作相关分析(图 1),得如下相关式

$$\text{砾型 } \rho_d = 2.317 + 0.119 \lg \sigma_N \quad r = 0.650 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{含屑砾型 } \rho_d &= 2.178 + 0.223 \lg \sigma_N, \\ r &= 0.847 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{岩屑砾型 } \rho_d &= 2.126 + 0.357 \lg \sigma_N, \\ r &= 0.901 \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)~(3)表明不同类型软弱层带的 ρ_d 与其所受天然压应力 σ_N 均呈正相关关系,且具有较好的相关性,其中又以岩屑砾型相关性最好,这表明因地应力引起的压应力 σ_N 对无泥型软弱层带 ρ_d 的控制作用是显著的。

1.2.2 软弱层带 ρ_d - e 关系

同理,对表 1 中各软弱层带 e 与对应的 σ_N 作相关分析(图 1),也可得出如下相关式

$$\text{砾型 } e = 0.256 - 0.109 \lg \sigma_N \quad r = -0.785 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{含屑砾型 } e &= 0.422 - 0.222 \lg \sigma_N, \\ r &= -0.978 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{岩屑砾型 } e &= 0.440 - 0.308 \lg \sigma_N, \\ r &= -0.954 \end{aligned} \quad (6)$$

可见,不管哪类软弱层带,随 σ_N 增高,其组成物质的 e 逐渐减小,两者呈负相关关系,这与室内土工压缩试验结果是一致的。不同的是室内土工试验时间较短,而天然地应力条件下引起的 σ_N 对软弱层带压密时间很长,其组成物质可以得到充分的固结。

2 无泥型软弱层带物理性质的围压效应模拟研究

如前所述,由构造作用产生的破碎夹层,从形成到后期的压实和固结过程,与沉积物的压实固结过

表 1 软弱层带物理性质指标与对应的压应力

类型	试样编号	σ_N (MPa)	ρ_d (g/cm ³)	e
砾型	PD18-LC ₁	3.87	2.405	0.160
	PD27-LC ₁	1.55	2.396	0.183
	PD21-C ₇	1.01	2.386	0.247
	PD28-C ₉	1.69	2.210	0.252
	PD38-LC ₁	5.40	2.557	0.197
	PD11-LC ₁₄	9.66	2.441	0.121
	PD33-LC ₂	1.51	2.339	0.236
	PD31-LC ₅	1.04	2.269	0.299
	PD26-C ₉	1.85	2.177	0.384
	PD12-LC ₂	2.69	2.201	0.336
含屑砾型	PD36-LC ₅	4.62	2.332	0.279
	PD11-LC ₁₅	9.66	2.416	0.193
	PD49-C ₉	1.23	2.242	0.378
	PD11-LC ₆	5.75	2.376	0.234
岩屑砾型	PD36-LC ₃	3.28	2.232	0.335
	PD27-LC ₂	1.55	2.208	0.377
	PD13-C ₁₁	4.79	2.357	0.244
	PD51-C ₈	2.64	2.372	0.255
	PD7-LC ₁₈	9.85	2.561	0.123
	PD12-LC ₄	8.65	2.390	0.204

程在本质上是相似或相同的。基于这一事实,为了模拟无泥型软弱层带自然条件下的压密、固结过程,选择上述三种类型的代表性扰动试样,分别将它们按现场颗粒级配作充分饱水且调成最松散状态进行固结,获得在不同压力下的 e 和 ρ_d 与相应软弱层带在天然压应力下的相应指标进行比较,以进一步阐述围压效应,同时为评价处于不同地段的不同类型软弱层带物理性质提供依据。

2.1 试验方法及成果

将三种代表性扰动试样(近饱水、松散状态)放入特制的压力容器,然后逐渐加压观察压力与压缩变形量(沉降量)的变化特点,试验过程严格按土工规范标准进行,即当每级荷载下试样的压缩变形量达到土工压缩标准时,即转入下一级荷载。试样初始状态指标及各试样模拟结果分别见表 2 和表 3。

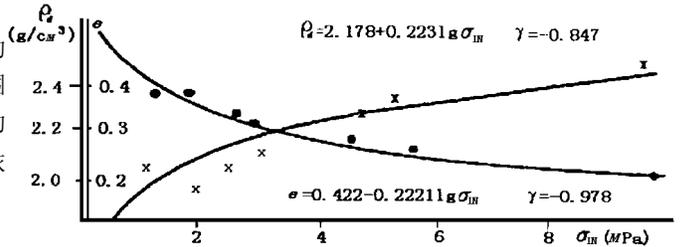


图 1 含屑砾型软弱层带 ρ_d 和 e 与 σ_N 关系曲线

Fig. 1 Curves between ρ_d or e and σ_N of weak interbed

表 2 软弱层带物理性质模拟试验初始状态指标

Table 2 Original state indexes of physical property simulating experiment of weak interbed

类 型	试样编号	w (%)	ρ (g/cm^3)	ρ_d (g/cm^3)	ρ_s (g/cm^3)	e	SR (%)
砾型	PD27-LC ₁	5.20	2.183	2.075	2.835	0.366	40.28
含屑砾型	PD26-C ₉	15.48	2.061	1.784	3.013	0.688	67.79
岩屑砾型	PD27-LC ₂	16.28	1.908	1.641	2.792	0.702	64.75

表 3 不同类型软弱层带物理性质模拟试验成果

Table 3 Physical property simulating experiment results of different types of weak interbed

砾型(PD27-LC ₁)			含屑砾型(PD26-C ₉)			岩屑砾型(PD27-LC ₂)		
σ_N (MPa)	e	ρ_d	σ_N (MPa)	e	ρ_d	σ_N (MPa)	e	ρ_d
0.239	0.315	2.156	0.092	0.562	1.929	0.091	0.531	1.824
0.387	0.302	2.177	0.151	0.521	1.981	0.120	0.515	1.843
0.534	0.290	2.198	0.239	0.493	2.018	0.179	0.487	1.878
0.682	0.277	2.220	0.357	0.470	2.050	0.238	0.464	1.907
0.829	0.272	2.229	0.475	0.455	2.071	0.298	0.448	1.928
1.124	0.253	2.263	0.593	0.444	2.087	0.357	0.435	1.946
1.420	0.239	2.290	0.829	0.425	2.114	0.416	0.425	1.959
1.715	0.225	2.314	1.095	0.406	2.143	0.652	0.389	2.010
2.010	0.214	2.335	1.331	0.390	2.168	0.888	0.368	2.041
2.305	0.206	2.351	1.656	0.368	2.202	1.184	0.352	2.065

2.2 模拟试验成果分析

不同类型软弱层带物理性质的压应力效应模拟试验成果能否准确反映野外客观实际状况,是判定围压效应和模拟试验是否能够用来分析某一地段软弱层带物理性状的关键。为了比较由现场实测结果得出的 $\rho_d - \sigma_N$ 和 $e - \sigma_N$ [公式(1)~(6)], 同样将表 3 所列的三种软弱层带模拟结果中 σ_N 与相应的 ρ_d 和 e 进行回归分析, 也可得如下相关式:

砾型(PD27-LC₁): $\rho_d = 2.262 + 0.2061g\sigma_N, r = 0.984$ (7)

$e = 0.254 - 0.0961g\sigma_N, r = -0.973$ (8)

含屑砾型(PD26-C₉): $\rho_d = 2.140 + 0.1971g\sigma_N, r = 0.995$ (9)

$e = 0.408 - 0.1441g\sigma_N, r = -0.998$ (10)

$$\text{岩屑砾型 (PD27-LC}_2\text{): } \rho_d = 2.047 + 0.218 \lg \sigma_N, r = 0.999 \quad (11)$$

$$e = 0.361 - 0.165 \lg \sigma_N, r = -0.999 \quad (12)$$

针对不同软弱层带现场实际所受的压应力 σ_N 分别代入相应类型的上述相关式(7)~(12)后,可计算出对应的 ρ_d 和 e , 然后再与现场天然状态下实测的 ρ_d 和 e 一并列入以相互比较(表4)。

表4所示的资料表明,通过由模拟试验经验公式(7)~(12),代入 σ_N 计算所得的软弱层带 e 除个别外,普遍较现场实测值要高,而 ρ_d 则较现场实测结果要稍低一些。据分析,产生上述现象的主要原因是,由于软弱层带颗粒较粗,在室内模拟试验制样过程中,尽管尽量按现场颗粒级配进行配制,但仍难以很准确地模拟原位条件下粗碎屑之间的相互接触关系,且粒度愈粗影响愈大。

但从表4仍可看出,尽管现场与室内模拟结果两者之间存在一定误差,如 ρ_d 为 0.17~6.70%, e 为 0.42~27.31%,但还是接近的,这也表明模拟结果是可以接受的,同时也表明对无泥型软弱层带而言,其围压效应确实是显著的。而且更有意义的是,根据公式(7)~(12),对于分析水电工程区尚未勘探到的软弱

层带,尤其是在河床以下难于取样试验的软弱层带物理性质等参数取值,具有经济、快速、且较为可信等优点。

3 结 语

1. 如同含泥型软弱层带,处于山体深部较高围压作用下的无泥型软弱层带,因地应力作用,其压密效应也是显著的。野外实测数据分析表明,由地应力引起的围压 σ_N 越大,则这种效应越明显。显然,这种无泥型软弱层带从形成到后期的压密过程,在本质上与一般沉积物的固结过程是相似或相同的。

2. 通过对三种类型(砾型、含屑砾型和岩屑砾型)软弱层带的室内 σ_N 固结模拟试验表明,其物理性质 ρ_d 和 e 确实存在围压效应,且 ρ_d 和 e 分别与 σ_N 成正、负相关关系。比较室内模拟和野外实测成果,两者极为相近。

3. 对无泥型软弱层带的物理性质围压效应机理的揭示,不仅改变了以往取值忽略地应力作用,使参数取值更趋合理;而且更有意义的是,通过 ρ_d 、 e 与 σ_N 的相关式建立,对于分析水电工程区尚未勘探到的、尤其是处于河床以下难于取样试验的软弱层带的物理性质参数取值,具有经济、快速等特点。

参 考 文 献

- [1] 张倬元, 聂德新, 刘家铎等. 金沙江向家坝水电站坝址岩石及软弱夹层研究. 成都: 成都科技大学出版社, 1993, 117~149.
- [2] 聂德新, 张成恭, 韩文峰等. 坝基岩体抗滑稳定分析中软弱层带抗剪强度参数偏低的主要原因分析. 全国第三次工程地质大会论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1988, 332~337.

表4 软弱层带现场实测物理性质指标及由模拟试验结果得出的相应值

Table 4 Weak interbed physical property by in situ measuring and simulating experiment

类型	试样编号	σ_N (MPa)	ρ_d (g/cm ³)			e		
			天然	模拟	差值 (%)	天然	模拟	差值 (%)
砾型	PD18-LC ₁	3.87	2.405	2.383	-0.92	0.160	0.198	19.19
	PD27-LC ₁	1.55	2.396	2.302	-4.08	0.183	0.236	22.46
	PD21-C ₇	1.69	2.210	2.309	4.29	0.252	0.232	-8.62
	PD28-C ₉	5.40	2.557	2.413	-5.97	0.197	0.271	27.31
	PD38-LC ₁	1.01	2.386	2.263	-5.44	0.247	0.254	2.76
	PD11-LC ₁₄	9.66	2.441	2.465	0.97	0.121	0.119	-1.68
	PD33-LC ₂	1.04	2.269	2.266	-0.13	0.299	0.301	0.66
	PD31-LC ₅	1.51	2.399	2.299	-4.35	0.236	0.237	0.42
	PD26-C ₉	1.85	2.177	2.209	1.45	0.384	0.370	-3.78
	PD12-LC ₂	2.69	2.201	2.184	-0.78	0.336	0.346	2.89
含屑砾型	PD36-LC ₅	4.62	2.332	2.273	-2.60	0.279	0.312	10.58
	PD11-LC ₁₅	9.66	2.416	2.334	-3.51	0.193	0.266	27.44
	PD49-C ₉	1.23	2.242	2.158	-3.89	0.378	0.395	4.30
	PD11-LC ₆	5.75	2.376	2.290	-3.76	0.234	0.298	21.47
岩屑砾型	PD36-LC ₃	3.28	2.232	2.241	0.40	0.335	0.333	-0.60
	PD27-LC ₂	1.55	2.208	2.319	4.79	0.337	0.330	-14.24
	PD13-C ₁₁	4.79	2.357	2.347	-0.43	0.244	0.249	2.00
	PD51-C ₈	2.64	2.372	2.223	-6.70	0.255	0.347	26.51
	PD7-LC ₁₈	9.85	2.561	2.502	-2.36	0.123	0.149	17.45
PD12-LC ₄	8.65	2.390	2.386	-0.17	0.204	0.206	0.97	

- [3] 张咸恭, 聂德新, 韩文峰等. 围压效应与软弱夹层泥化可能性分析. 地质论评, 1990, 36(2): 160~167.
- [4] 聂德新. 地应力对夹泥抗剪强度的影响. 1983年全国水电中青年科技干部报告会论文选集. 北京: 水利电力出版社. 1985, 131~138.
- [5] 任光明. 软弱层带夹泥的强度再生效应研究. 成都理工学院硕士学位论文. 1995, 15~57.

作者简介 胡卸文, 男, 35岁, 博士, 教授. 1988年毕业于成都理工学院(原成都地质学院)并留校任教. 1998—07调入西南交通大学. 主要从事工程地质、环境地质及岩土工程的教学和研究. 在国内外发表论文40多篇.

CONFINING PRESSURE EFFECT TO PHYSICAL PROPERTY OF NO-CLAY WEAK INTERBED

HU Xie wen

(Department of Engineering Geology, Jiaotong University of Southwest Chengdu 610031)

Abstract

Through analysing the correlation between physical property of no clay weak interbed obtained by in situ test and its existed geostress, and combining the confining pressure simulating test results of disturbed weak interbed sample, we show that the controlling effect of confining pressure to physical property of no clay weak interbed is very evident, as the same of clay weak interbed. Based on a large amount of field testing data, and using positive pressure effect theory, we reveal not only the weak interbed's physical properties in different regions (geostress), but also re display the changing process of physical property of weak interbed through model testing, and establish correlative equation between dry density ρ_d and positive pressure σ_N for different kinds of weak interbed. For example, gravel type: $\rho_d = 2.262 + 0.2061g\sigma_N$; sand bearing gravel type: $\rho_d = 2.140 + 0.197kg\sigma_N$; sand and gravel type: $\rho_d = 2.047 + 0.2181g\sigma_N$.

Key words weak interbed, physical property, confining pressure effect