

# 滇西玄武岩全强风化层工程特性及地基处理方法

谢春庆

(成都军区空军勘察设计院 成都市 610041)

**提 要** 该文通过滇西某大型工程实践和长期的变形观测,系统地研究了该区玄武岩全风化层和强风化层的分布特征、工程特性和地基处理方法。结果表明:滇西玄武岩全强风化层分布极不均匀,具有高含水量、大孔隙比、高压缩性、低承载力的工程特性;原地地基适宜处理方法是换填、碾压、冲压、强夯和桩基等,填筑体压实适宜方法是碾压以及冲压和强夯补强。该研究成果目前被当地广泛借鉴,对边贸、旅游飞速发展而建设经验十分缺乏的滇西地区的工程建设具有一定的指导意义。

**关键词** 滇西 玄武岩 风化层 工程性能 地基处理

## Engineering Properties and Ground Treatment Method of Completely-highly Weathered Basalt in Western Yunnan

Xie Chunqing

(Prospect and Design Institute of Chengdu Military Command Air Force)

**Abstract** Based on long-term deformation observation of a large-scale construction in western Yunnan, this paper gives a systematic research about the distributing characteristic, engineering properties and foundation treatment of completely-highly weathered basalt in this area. The results show that the distribution of completely-highly weathered basalt in western Yunnan is uneven, which has the engineering properties of high water content, big void ratio, high compressibility, low bearing capacity. The applicable treatment method of original ground foundation are replacement, compaction by rolling, stamping, dynamic compaction and pile foundation, while treatments for settlement are compaction by rolling, stamping and reinforcing the dynamic compaction. The studies results are widely adopted by local people at present, and it plays an important guiding role for local engineering construction in which the tourisms and cross-border is rapidly developed while the construction experience is lack.

**Keywords** western Yunnan; basalt; weathered layer; engineering properties; foundation treatment

### 1 前言

滇西位于祖国的西南边陲,由于地理位置和历史的原因,重大工程建设很少。随着西部的开发,边贸和旅游业发展,近年修建了一些低矮旅游建筑,积累了部分工程建设经验,但对区内广泛分布的玄武岩风化层仍缺乏系统研究。经调查,工程建设存在较大的浪费和安全隐患。本文结合某大型工程实践和长期的变形观测,系统地研究了滇西玄武岩风化层

分布特征、工程特性和地基处理方法,对区内工程建设具有一定的指导意义。

依托工程为投资数十亿元的大型工程,包括整平区和依山建筑区。整平区长 2600m,宽 450m,最大挖方高度 35m,最大填方高度 60m,挖填土石方量约为 2000 万  $m^3$ 。挖填方整平后,要求工后沉降小于 10cm,不均匀沉降小于 5‰。

### 2 地层基本特征

#### 2.1 场区地层

1) 第四系残坡积粉质粘土( $Q_4^{cl+dl}$ ):褐黄、褐色,以可塑状态为主,局部硬塑态,稍湿~湿,以湿为主。遇水易软化,土质不均匀,含玄武岩小碎块,除

作者简介:谢春庆(1969-),男,高级工程师,注册岩土工程师,主要从事岩土工程工作。

收稿日期:2012-08-16

冲沟外,整个场区均有分布。厚 0.4 ~ 17.6m,一般厚 2 ~ 6m,平均厚 4.5m。

2) 上更新统安山质玄武岩( $Q_3^{1b-2b}$ ): 褐灰、紫灰、深灰、紫红等色,斑状结构,杏仁状构造。根据风化程度可分为全风化、强风化、中风化,如图 1。

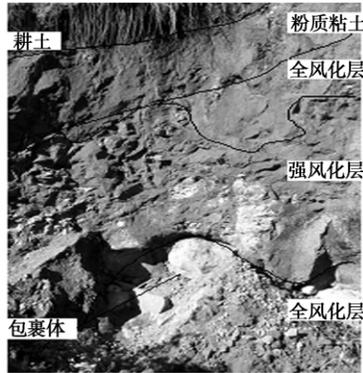


图 1 典型的玄武岩全风化层剖面

①全风化玄武岩: 褐灰、紫灰、深灰、紫红等色。岩芯呈土状,少量碎块状,碎块用手可捏碎和轻轻折断。用镐易挖掘,干钻可钻进。整个研究区均有分布,台地部位厚度较大,浅切割缓坡部位厚度较小。厚度 0.4 ~ 50m,一般 3 ~ 12m,平均厚 7.91m。

②强风化玄武岩: 褐灰、紫灰、深灰、紫红等色,岩石原始结构大部分破坏,但清晰可见。岩芯多呈碎石状,探井挖掘的多呈碎块状。岩块用锤易击碎,用镐可挖掘,干钻钻进困难,与全风化层呈透镜体状及互层分布。

### 2.2 分布特征

区内玄武岩地层由火山多次喷发形成,由于每次火山喷发以及每次喷发前后物质差异,其每次形成的玄武岩密度、空隙、力学性能以及抗风化能力等均有所差异,造成了玄武岩强风化与全风化在垂向上和平面上交叉或重叠分布,厚度差异大,无一定的分布规律,同时在两者中还夹有中风化包裹体;玄武岩全风化与强风化层一般无明确的界面,两者之间是一种渐变关系。

## 3 工程特性

### 3.1 物理性质特征

1) 矿物成分。全风化和强风化玄武岩化学成分见表 1。

表 1 全风化和强风化玄武岩化学成分

成分	区间值/%	均值/%
SiO <sub>2</sub>	19.5 ~ 45.8	39.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28.33 ~ 39.47	30.68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.83 ~ 12.95	12.83
CaO	0.12 ~ 0.99	0.30
MgO	0.44 ~ 1.77	1.26

2) 密度。取全风化和强风化玄武岩作密度试验,成果如表 2。从表 2 可见,全风化和强风化玄武岩密度小,且变化大。

表 2 密度统计

项目	全风化玄武岩	强风化玄武岩
样本数	165	172
最大值/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.71	1.75
最小值/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.37	1.44
均值/(g · cm <sup>-3</sup> )	1.58	1.69
变异系数	0.357	0.369

3) 水理性质。取样在室内作含水量、孔隙比试验和渗透试验,在现场作抽水试验、压水试验,获得全风化和强风化玄武岩水理特征参数如表 3。从表 3 可见,全风化和强风化玄武岩具有高含水量、高饱和度和低渗透性的特征,且渗透性差异明显。

表 3 水理特征参数

参数	项目	全风化玄武岩	强风化玄武岩
含水量	最大值/%	72	64
	最小值/%	44	49
	均值/%	54.14	52.86
	变异系数	0.1358	0.158
饱和度	最大值/%	100	93
	最小值/%	73	82
	均值/%	88.43	88.86
	变异系数	0.075	0.048
渗透系数	最大值 /( × 10 <sup>-6</sup> cm · s <sup>-1</sup> )	3.7	7.9
	最小值 /( × 10 <sup>-6</sup> cm · s <sup>-1</sup> )	1.8	0.08
	均值 /( × 10 <sup>-6</sup> cm · s <sup>-1</sup> )	2.5	1.2
	变异系数	0.641	0.996

4) 结构特征。全风化、强风化玄武岩结构具有如下特征: ①全风化层土质不均匀,含小碎块,粒组成分变化很大,主要粒径集中在 0.25 ~ 0.005mm,占 60% 以上; ②遇水易软化,风干后易击碎成粉末; ③孔隙比一般为 1.4 ~ 1.80,最大可大于 2.1。

5) 波速特征。在现场对全风化和强风化玄武岩作孔内波速及地表面波测试。全风化玄武岩纵波速度  $V_p = 726 \sim 1020$  m/s, 均值 886 m/s; 横波速度  $V_s = 321 \sim 442$  m/s, 均值 396 m/s。强风化玄武岩纵波速度  $V_p = 1874 \sim 2315$  m/s, 均值 2078 m/s; 横波速度  $V_s = 883 \sim 1142$  m/s, 均值 1003 m/s。

3.2 力学特征

1) 承载力特征。根据室内常规试验和现场的标准贯、静力触探、静载荷试验等,综合获取全风化和强风化玄武岩承载力,其成果见表4。从表4中可见全风化和强风化玄武岩承载力及变形模量变化极大。

表4 承载力及变形模量统计

参数	项目	全风化玄武岩	强风化玄武岩
承载力特征值 $f_k$	样本数	32	24
	最大值/kPa	190	245
	最小值/kPa	88	120
	均值/kPa	136	163
	变异系数	0.452	0.441
变形模量 $E_s$	最大值/MPa	29.0	39.5
	最小值/MPa	4.5	14.5
	均值/MPa	15.0	20.5
	变异系数	0.665	0.578

2) 抗剪特性。完成了室内300余件常规、三轴剪切、无侧限抗压强度试验和多组现场大剪试验。现场大剪试验具有代表性,成果如表5。从表中可见全风化和强风化玄武岩抗剪参数尽管变化很大,但数值较大,它很好地解释了场区自然边坡稳定性较好的原因。

表5 抗剪参数统计

参数	项目	全风化玄武岩	强风化玄武岩
$\varphi$	样本数	12	8
	最大值/(°)	20.5	23.5
	最小值/(°)	16.7	15.4
	均值/(°)	17.3	21.6
	变异系数	0.456	0.671
c	最大值/kPa	67.5	93.8
	最小值/kPa	26.2	37.2
	均值/kPa	37.5	63.4
	变异系数	0.335	0.478

3.3 变形特征

完成了室内300余件固结、高压固结试验和多组现场静载荷试验,成果见表4、6。全、强风化的玄武岩孔隙比大,且平均孔隙比和平均压缩系数与压力呈现非常好的相关性,相关系数大于0.98<sup>[1]</sup>。根据场地地层、相关试验参数,选取典型地段计算原地地面地基变形,见表7。从表中可见全风化和强风化玄武岩原地地面地基在填方荷载作用下变形较大。

表6 典型样品高压固结试验成果

压力/kPa	孔隙比	压缩系数
0	1.448	0.960
50	1.400	0.540
100	1.373	0.460
200	1.327	0.420
300	1.285	0.370
400	1.248	0.350
600	1.175	0.280
800	1.120	

表7 场区典型地段原地地面地基变形计算

点号	填土高度/m	沉降量/mm	点号	填土高度/m	沉降量/mm
1	5.8	95.5	8	35.6	231.3
2	14.0	136.2	9	35.9	167.6
3	15.2	128.9	10	37	227.1
4	18.8	130.7	11	37.6	358.1
5	22.6	170.6	12	44.0	282.1
6	26.1	263.2	13	55.9	275.3
7	30.6	173.0			

3.4 填料压实特性和填筑体抗剪性能

采取挖方区全、强风化的玄武岩作重型击实试验和不同压实度样品的剪切试验,全风化的玄武岩和强风化玄武岩样品最大干密度和最佳含水量无明显差别,最大干密度在1.297~1.545g/cm<sup>3</sup>,最佳含水量23.0~37.6%。最大干密度和最佳含水量有良好的线性相关关系,最大干密度随最佳含水量增大而减小,见图2。

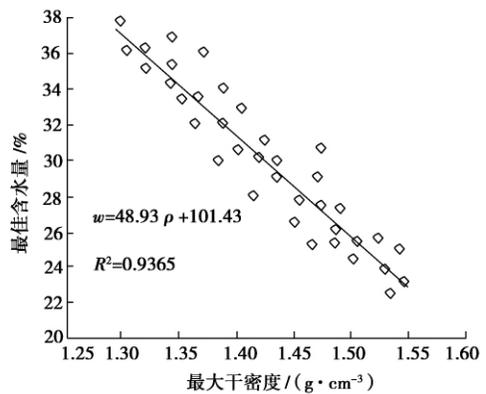


图2 最大干密度与最佳含水量关系

全强风化的玄武岩填料随压实度增加,抗剪性能增加。90%以上的样品压实度与内摩擦角呈现良好的线性关系,见图3。

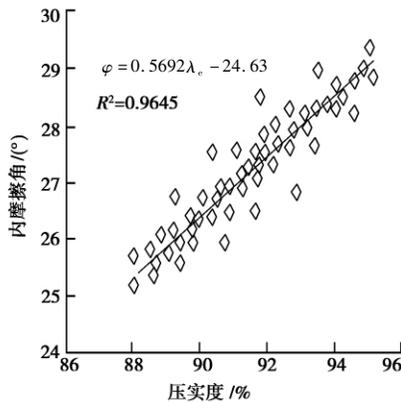


图 3 全强风化的玄武岩压实度与内摩擦角关系

### 4 地基处理与变形特征

#### 4.1 土方整平区地基处理与变形特征

##### 4.1.1 原地面地基处理

全、强风化的玄武岩原地面地基处理分为：碾压、冲压、强夯和水泥搅拌桩、碎石桩。同一施工方式采用不同施工参数对比试验。结果表明，各种施工方式的最佳工艺参数和效果如下：

1) 原地面振动碾压(50t, 走速 ≤ 4km/h), 最佳遍数 6 ~ 8 遍, 压实度可达 90%, 有效影响深度 0.3 ~ 0.5m。

2) 原地面冲压(32kJ, 走速 12km/h), 最佳遍数 18 ~ 20 遍, 压实度可达 90%, 有效影响深度 > 1m。

3) 原地面置换强夯(2000 ~ 3000kN · m), 置换深度 1.5 ~ 4m, 有效影响深度 6m, 复合地基承载力 200 ~ 280kPa。

4) 水泥搅拌桩布置在地下水浅埋的高填方区, 施工参数: 桩径 600mm, 桩间距 2.4m 和 3.0m, 置换率 5.7% 和 3.6%, 按进入强风化层 1m 控制, 最大桩长 15m, 水泥掺入量 15%, 水灰比 0.5。试验表明: 桩体上部约 3m, 水泥富集, 3m 以下成桩困难。10m 以内桩体 90d 抗压强度一般大于 2MPa, 10m 以下所有桩体强度低于 2MPa, 5m 以下桩体内摩擦角 10° ~ 20.9°, 粘聚力 30 ~ 200kPa, 不满足设计要求。

5) 碎石桩桩径 500mm, 桩间距 1.5m, 等边三角形布置, 桩长 15m。试验检测表明: 成桩良好, 单桩承载力 250 ~ 300kPa, 复合地基承载力 150 ~ 180kPa, 满足设计要求。

##### 4.1.2 填筑体压实

经多个试验区的碾压、冲压和强夯经济技术对比分析, 全、强风化的玄武岩填筑施工, 碾压方式总体最优, 其施工参数见表 8。

表 8 填筑碾压施工参数

机具	速度/(km · h <sup>-1</sup> )	虚铺厚度/m	碾压遍数
45t 振动压路机	≤ 4.5	0.5	6 ~ 8

当需要加速沉降和解决填筑体不同工作面接坡时, 可进行强夯和冲压补强。其中强夯补强效果优于冲压, 但冲压效率和经济性明显优于强夯, 宜根据工期、场地条件、施工所处的季节等选用(滇西雨季长达 7 个月)。

强夯施工参数: 1000kN · m, 夯点间距 2.5m, 单点击数 8 ~ 10 击, 分层厚度 5m; 冲压施工参数: 速度 8 ~ 12km, 分层厚度 1m, 18 ~ 20 遍。

##### 4.1.3 填筑体边坡

填筑体边坡坡度可根据填筑高度和场地条件选取。经计算、试验和工程实践, 当填方高度不超过 70m(垂高), 一般可取综合坡比 1:2.2, 单级坡比 1:2, 每 8 ~ 12m 高度设置马道, 宽 2 ~ 3m。若场地条件有限, 可加土工材料, 增大坡比, 具体数值应通过计算和试验确定。

##### 4.1.4 变形观测与特征

对整个填方区严格按照规范要求埋点和进行长期变形观测, 填筑体变形具有如下特征:

- 1) 沉降与填方厚度呈正比, 填方厚度大, 变形大。
- 2) 受填料大孔隙比, 高含水量影响, 填筑完成后仍处于主固结阶段, 表现为各观测点的 S - lgt 曲线以下沉降为主, 末端逐渐表现出平缓趋势, 见图 4。

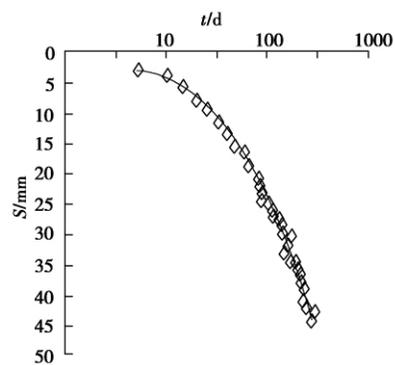


图 4 代表性观测点 S - lgt 曲线

3) 填筑体沉降初期速率大, 后期沉降速率小。填方高度 40 ~ 60m 区段, 前 5 个月各观测点沉降速率的减小幅度可达 1/3 ~ 2/3。

4) 工后沉降的月平均沉降速率 90% 以上呈现指数函数关系(图 5)。填方完成 14 个月后, 月平均沉降速率接近于 0, 主固结沉降完成, 进入次固结沉降阶段, 可以进行道面铺设等工作。该指数模型预测结果与长观结果很相近, 可用于类似工程的沉降预测。

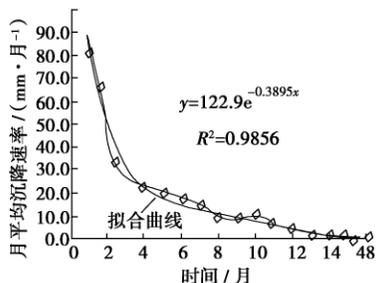


图5 代表性观测点沉降速率变化过程拟合曲线

#### 4.2 依山而建房屋地基处理

拟建物为低层的普通建筑和大跨度的建筑,总建筑面积 2.75 万  $m^2$ 。

##### 4.2.1 低层轻荷载普通建筑

低层的普通建筑为 2~5 层的生产、办公和生活用房,砖混结构,条形基础。70% 以上建筑区进行了 2000~3000  $kN \cdot m$  的强夯或根据地形地貌和全强风化层厚度以及建筑物层数换填厚 0.5~1.2m,压实度 93% 的级配碎石。30% 的建筑区未经处理,直接将基础置于全强风化玄武岩上。投入使用 3 年后回访调查,经强夯处理区和换填区的建筑未发现明显变形,安全使用。未处理区的建筑物 40% 发生了不同程度的开裂、倾斜,最严重的一栋二层建筑由于纵横向开裂分别达 1.8cm 和 3cm 而停止使用。

##### 4.2.2 大跨度建筑

拟建建筑为 2 栋三层大跨度的重要建筑物(最大跨度 18m,一般跨度 12m),柱底最大轴力设计值 800t,最小设计值 450t。其中一栋处于高处,不受地下水影响,另一栋位于坡脚及沟沿,地下水位埋深 5m。拟建区表层粉质粘土厚 3~8m,其下全强风化玄武岩交错分布,总厚度 5~15m。粉质粘土和全强风化玄武岩厚度之和 9~22m。全强风化玄武岩之下为中风化玄武岩。

1) 桩基。高处建筑物采用人工挖孔桩,试桩区为附属用房,要求挖到强风化玄武岩,以其作为桩端

持力层,摩擦端承桩。桩径 1m,桩长 9~15m,布置试验桩 12 根。成桩后 30d 进行桩顶静载荷试验,桩端承载力 360~900t,平均值 550t,变异系数 0.426,无法满足拟建物承载力和均匀沉降要求。加深桩长,改为以中风化玄武岩为桩端持力层的端承桩,成桩后桩顶静载荷试验,单桩承载力大于 1000t,满足设计要求。

试桩区仍为以强风化玄武岩作桩端持力层的摩擦端承桩,作为柱底轴力设计值 200~300t 的附属用房的基础。

2) 筏基。低处建筑物采用筏基。为减小不均匀沉降,在基底下换填 0.6m 级配碎石,粒径不大于 5cm,压实度 93%,干密度  $\geq 2.1g/cm^3$ 。

这两栋大跨度主体建筑建成使用 4 年,未发现任何问题,变形观测结果满足规范要求。但以强风化为桩端持力层的附属用房竖向开裂,最大位移差 3cm。

## 5 结论与建议

1) 滇西全风化、强风化玄武岩地层分布不均,具有高含水量、大孔隙比,高压缩性、低承载力,遇水易软化的工程特性,属典型的不均匀地基。

2) 填方整平区原地面地基适宜处理方法为碾压、冲压、强夯、碎石桩等;填筑体适宜的压实方法为振动碾压,冲压、强夯是加速沉降、补强的有效方法。

3) 全强风化玄武岩不可直接作为建筑物的持力层,低层轻荷载普通建筑地基可采用换填或强夯处理方法;大荷载的框架构筑物可采用以中风化玄武岩为桩端持力层的端承桩,不宜采用强风化层作为桩端持力层。

### 参考文献

- [1] 谢春庆,邱延峻.全强风化玄武岩路用工程性质研究,路基工程 2006(6):86~88