

# 预应力 CFRP 加筋土路堤现场试验研究

杜运兴, 尚宁平, 周 芬

(湖南大学土木工程学院 长沙市 410082)

**摘 要:** 预应力 CFRP 加筋土技术是应用碳纤维增强塑料(CFRP)作为加筋材料, 通过对加筋土体侧向的 CFRP 筋带端部进行张拉并锚固, 给侧向土体施加侧向压力, 进而增加土体的稳定性和强度。将这一技术应用于临长高速公路, 对该试验路堤进行了沉降观测、弯沉试验测试。试验表明, 该技术可以显著提高加筋土路堤的回弹模量和加速加筋土结构沉降稳定。

**关键词:** CFRP 筋带; 加筋土; 沉降; 现场试验

预应力 CFRP 加筋土技术是一种新型的土工增强技术, 它采用了新型的加筋土材料碳纤维增强塑料(简称 CFRP), 并在形成的加筋土体侧向张拉筋带端部, 对土体施加预压应力, 进一步提高土体的强度和稳定性。这项技术中充分利用了 CFRP 材料的高弹性模量、徐变小、化学稳定性好的特点。三轴试验、模型试验的结果表明, 预应力 CFRP 加筋土技术将会大大提高加筋土结构的承载力, 同时减少了这种结构的变形<sup>[1]</sup>。为了进一步测试这项技术的实用性, 在临长高速公路中选取了一段试验路, 应用该技术施工, 并对该路段的沉降、强度进行观测和测量, 并与相似路段的测试结果进行了比较。

## 1 CFRP 材料性质的测试

CFRP 材料的力学性能直接影响着加筋土的强度。将 CFRP 材料用作加筋材料之前, 需对该种材料的力学性能进行测试。该材料的弹性模量、强度、CBR 顶破强度、刺破强度测试结果列于表 1。

表 1 CFRP 材料力学性质

| E/GPa | 强度/MPa | CBR 顶破强度/kN | 刺破强度/kN |
|-------|--------|-------------|---------|
| 162   | 2 662  | 3.28        | 0.57    |

## 2 现场概况

试验路段位于京珠高速公路湖南段, 设计路幅宽 28 m, 双向四车道, 中央分隔带宽 3.75 m; 路堤边

坡坡率设计为 1:1.5。其北京方向有 1 座分离式钢筋混凝土盖板通道, 通道两侧采用重力式 U 型桥台。珠海方向为 1 座三跨桥, 该桥采用墩式轻型桥台。U 型桥台与墩式轻型桥台之间路段填土, 该路段桥台间距离较近, 平均填土高度又达 7.4 m, 难以采用大型压实机械施工, 不易压实。因此, 对该路段采用预应力 CFRP 技术。试验路段如图 1 所示。

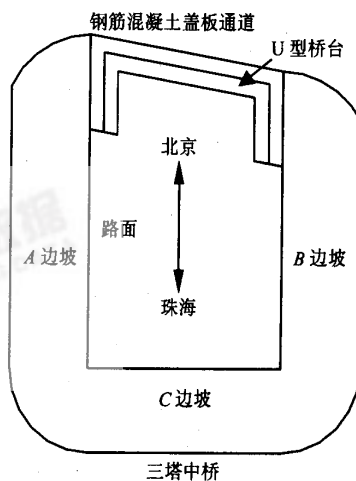


图 1 试验路段示意

该段工程的地质条件较差, 原为水稻田。钻孔地质柱状图表明: 原地表以下 0~0.5 m 为灰褐色、稀软的种植土; 0.5~3.5 m 为黄褐色、呈可塑状的低

液限粘土;3.5 m 以下为板岩,其中 3.5~4.3 m 为灰黄色、岩性较弱的强风化层。施工前该路段已经

表面清淤,回填土为含砾红粘土(具体工程性质见表 2)。

表 2 填土土工试验结果

| 液塑限试验    |          |       | 击实试验                   |             | CBR  |      |      |     | 平均<br>膨胀量/% | 工程分类 |
|----------|----------|-------|------------------------|-------------|------|------|------|-----|-------------|------|
| $w_L/\%$ | $w_P/\%$ | $I_p$ | $\rho_{dmax}/(g/cm^3)$ | $w_{op}/\%$ | 100% | 95%  | 93%  | 90% |             |      |
| 44.2     | 23.0     | 21.2  | 1.81                   | 15.2        | 24.4 | 12.4 | 10.6 | 7.8 | 2.3         | CL   |

### 3 试验设计及试验准备

试验路段长宽方向的长度相差很少,如果仅仅只在横截面位置铺设筋带,加筋材料对该路段的约束便不可靠。因此,该路段采用双向铺设筋带。

加筋层从路面标高下 5.18 m 处开始,层间距为 800 mm,共铺设 7 层。横向筋带垂直于路线方向,纵向筋带平行于路线方向。A、B 边坡中不铺设纵向筋带,C 边坡不铺设横向筋带(位置如图 1 所示)。U 型桥台内部同样铺设筋带。筋带沿全长铺设,在所有筋带的端头必须进行锚固,如果筋带的端头位于 U 型桥台内部,则应该在 U 型桥台处用锚板、锚具将其锚固,不进行张拉。如果筋带的端头位于边坡中,则筋带端头锚固前必须先经过预应力张拉,有效预应力控制在 3~4 kN。

锚板为水泥混凝土预制板,尺寸为 400 mm×400 mm,厚度为 80 mm。预制板内部双向布筋,每个方向为 4 根  $\phi 6$  的钢筋,等间距布置。板中间有一个直径为 22 mm 的洞孔。

为了测试不同填土深度上筋带的应变,在同一个横截面处的 7 根筋带上贴上应变计。应变计沿全长布置,间距为 2 m,第一片应变计位于锚板后 1.5 m。应变采用 YJ-5 型静态电阻应变仪测量。

路堤的填筑按如下步骤进行。

(1)填筑路堤直到加筋层位置,修整加筋层平面使其平整并达到路堤填筑设计所要求的压实度。

(2)在加筋平面上放线。首先确定路线的中心线,然后将其按 800 mm 的间距进行等分,确定横向布筋位置。根据横向布筋位置确定纵向布筋位置。布筋位置用灰线将其标记出来,如图 2 所示。

(3)在灰线标记的位置开槽。槽截面为 100 mm×100 mm,如图 3 所示。

(4)铺设筋带。首先用中砂找平槽底,铺设筋带并将其调直。位于 U 型桥台内的筋带端头必须采用锚板直接将其锚固。位于边坡位置的筋带端头必须给予保护,将该位置筋带端头放入 PVC 套管内, PVC 套管长 1.5 m。需要测量应变的筋带,应该在筋



图 2 放线



图 3 开槽

带上的测点位置用 AB 胶粘贴应变计,并且用透明胶带将其固定;还要用导线将测点引到边坡位置,并对导线进行编号。导线和筋带端头一起放入 PVC 管子内。将槽内铺满中砂,将筋带覆盖。

继续填筑路堤到下一铺筋平面,重复(1)~(4)步的工作,直到路堤填筑完成。

(5)对边坡进行修整,使其满足锚板安装及张拉的需要,边坡修整的剖面如图 4 所示。

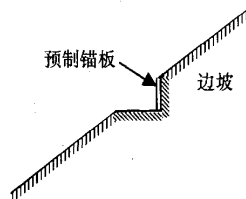


图 4 修整边坡

安装锚板时,将筋带端头的套管取出,使锚板的中心孔对准筋带,筋带从锚板的中心穿出。然后安装张拉设备,进行张拉,将筋带的端头锚固。

4 数据采集及分析

4.1 精加工面层的标高测量

在所有预应力索带张拉之前,在精加工层上布置9个高程观测点,如图5所示。每个高程观测点位置固定一块钢板,并在钢板中心用红漆做一个记号。9个高程观测点呈“田”字形分布。该试验共进行了4次高程测试。

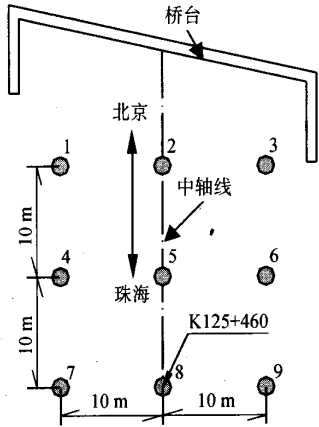


图5 高程测量位置

第1次测量,在筋带未施加预应力之前。

第2次测量,在B边坡、C边坡的预应力张拉、锚固完成后,与第一次测量相隔5d。

第3次测量,由于施工和天气的原因使试验终止了6d,在第7d对高程观测点测量。

第4次测量,在A边坡的筋带端头进行张拉、锚固后,紧接着对观测点进行测量。

表3给出了每次高程的观测数据。第1点的高程在前3次的测量中一直下降,第4次又有所增加;其余各点均在对边坡施加预应力后,短时间内高程均有所上升,随着时间的推移然后又下降,待下次施加预应力时,又有所上升,变化非常有规律。

第1点之所以与其他各点的高程变化规律不同,是因为该点处于施工车辆的出入口,路基不断地被车辆碾压造成的。第4次测量的时候,该通道已被拆除,因而又符合了规律。

4.2 精加工面层的弯沉值测量

弯沉试验的结果可以反映回弹模量的大小。弯沉试验的测点布置如图6所示,测试结果列于表4。

表3 高程测量结果

m

| 位置 | 第1次    | 第2次    | 第3次    | 第4次    |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 78.495 | 78.494 | 78.489 | 78.492 |
| 2  | 78.660 | —      | 78.647 | 78.652 |
| 3  | 78.789 | 78.789 | 78.785 | 78.796 |
| 4  | 78.670 | —      | 78.648 | 78.651 |
| 5  | 78.820 | 78.824 | 78.818 | 78.821 |
| 6  | 78.927 | 78.930 | 78.925 | 78.930 |
| 7  | 78.810 | —      | 78.799 | 78.802 |
| 8  | 78.953 | 78.967 | 78.954 | 78.957 |
| 9  | 78.982 | —      | 78.984 | 78.986 |

注:表中“—”表示此处高程观测点被破坏,此后数据为新制作的高程观测点记录

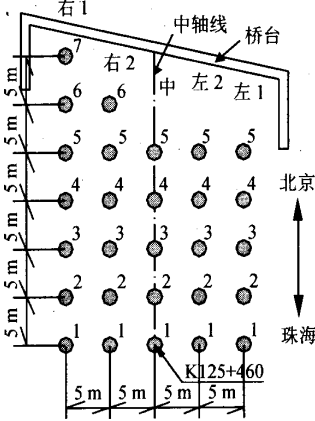


图6 弯沉试验测试点布置

为了便于比较,将弯沉值的变化列于表5。弯沉试验进行了2次。这2次弯沉试验的时间相隔5d。测试采用同一弯沉车。通过计算,第1次的代表弯沉值为1.147mm,第2次的代表弯沉值为0.952mm。这表明张拉后,路堤的同一地段弯沉值平均下降了17%,效果明显。

根据规范<sup>[2]</sup>可知,当其他参数不变时,如果代表弯沉值下降了17%,则路基回弹模量将提高20.5%。另外,试验表明,对边坡施加侧向预应力约束后,路基整体强度得到提高,而且还可以加快路堤的稳定。

4.3 路堤的长期沉降观测

对于公路建设,路堤的长期观测显得尤为重要。通常,长期沉降观测点应在精加工层完成之后埋设。由于考虑到底基层施工紧迫的实际情况,沉降观测点埋设在路堤填至95区时的位置。试验路段埋设了1个沉降观测点。为了对比分析,根据以下条件在临长高速公路上选取了几处地基及施工相似的路段进行了对比观测。选取对比路段的条件是:

表4 回弹弯沉试验值

0.01 mm

| 测 点 |    | 1   |     | 2   |     | 3   |     | 4   |     | 5   |     | 6   |     | 7   |    |
|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|     |    | 左   | 右   | 左   | 右   | 左   | 右   | 左   | 右   | 左   | 右   | 左   | 右   | 左   | 右  |
| 左1列 | I  | 106 | 136 | 116 | 104 | 116 | 104 | 122 | 114 | 108 | 94  | 126 | 106 |     |    |
|     | II | 86  | 80  | 62  | 74  | 112 | 90  | 100 | 88  | 96  | 112 | 116 | 110 |     |    |
| 左2列 | I  | 60  | 52  | 108 | 104 | 134 | 112 | 120 | 112 | 106 | 130 |     |     |     |    |
|     | II | 74  | 94  | 118 | 86  | 120 | 106 | 104 | 106 | 85  | 88  |     |     |     |    |
| 中列  | I  | 118 | 112 | 102 | 114 | 120 | 120 | 96  | 100 | 86  | 90  |     |     |     |    |
|     | II | 74  | 76  | 94  | 66  | 106 | 104 | 92  | 96  | 84  | 70  |     |     |     |    |
| 右1列 | I  | 126 | 106 | 126 | 118 | 102 | 102 | 72  | 94  | 88  | 92  | 106 | 104 | 66  | 74 |
|     | II | 64  | 96  | 100 | 72  | 62  | 88  | 76  | 82  | 72  | 84  | 94  | 84  | 108 | 72 |
| 右2列 | I  | 108 | 152 | 100 | 114 | 112 | 94  | 134 | 152 | 128 | 134 | 86  | 118 |     |    |
|     | II | 48  | 46  | 88  | 50  | 110 | 80  | 110 | 96  | 114 | 96  | 128 | 100 |     |    |

表5 弯沉变化值

| 测点      |    | 左1列   | 左2列   | 中列    | 右1列  | 右2列   |
|---------|----|-------|-------|-------|------|-------|
| 平均值     | I  | 112.5 | 103.8 | 105.8 | 98.3 | 119.3 |
| 0.01 mm | II | 93.8  | 98.2  | 86.2  | 82.4 | 88.0  |
| 降幅/%    |    | 16.6  | 5.4   | 18.6  | 16.2 | 26.2  |



图8 观测点累计沉降量

(1)对比路段观测点与试验路段观测点相距不远,在20 km 以内;

(2)地基条件相似,填筑前均为水稻田,经过简单的清淤后进行回填;

(3)填土高度均在5~7 m 之间,填土高度相差不大;

(4)填筑时间均在2001 年7 月、8 月份进行,施工条件相似。

根据以上的条件分别选取了A、B、C 路段位置进行沉降观测,与试验路段位置处的沉降观测记录进行对比。为了清楚地描述,沉降速率反映在图7 中,累计沉降量反映在图8 中。

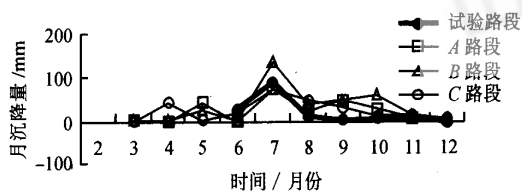


图7 观测点沉降速率

图7 反映了各观测点的沉降速率变化。试验路段的月沉降速率表现出很明显的单峰值,峰值发生在7 月、8 月份,对边坡施加预应力的时间发生在7 月下旬和8 月中旬。可以看出,当路堤填筑完成、预应力张拉完毕后,试验路堤的沉降速率也迅速下降并稳定。而其余各点的沉降速率表现出多峰值,表现

出路基沉降的不稳定。从图8 可以看出,试验路段虽然路段施工时间比较短,但是在路堤填筑完,侧向预应力张拉完毕后,其总沉降量迅速稳定。而其余3 个观测点的沉降不但在填筑过程中有较大的变化,在填筑结束后,沉降仍有较大发展,总沉降量也较试验路段高出了40%~120%。这说明,对路堤施加侧向预应力的约束,可以提高路堤土的变形模量,从而减少了路堤的沉降量。

#### 4.4 路堤内部筋带应变分布

筋带上应变测量的目的是为了观察预应力的影响、分布、传递范围。本试验拟进行的该项试验,由于测量导线受到破坏未能测得筋带上应变的分布。

## 5 结语

通过现场试验的测试与对比研究,预应力CFRP 加筋路堤技术应用于工程之后,在以下2 个方面明显地改善了路基的性质:

(1)采用预应力CFRP 技术后可以显著提高加筋土路堤的回弹模量;

(2)采用预应力CFRP 技术后能够加速加筋土结构沉降稳定。

路堤的回弹模量和沉降是反映路堤施工质量的2 个重要方面,预应力CFRP 加筋路堤技术对于路堤的这2 个方面都有明显的改善。

文章编号: 0451-0712(2006)05-0131-04

中图分类号: TU413.6

文献标识码: B

# 人工神经网络与遗传算法的结合在土钉支护优化设计中的应用

刘大鹏<sup>1,2</sup>, 周建中<sup>1</sup>, 尤晓晔<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 武汉市 430074; 2. 北京交通管理干部学院 北京市 101601)

**摘 要:** 近年来, 由于智能化方法——人工神经网络和遗传算法所具有的种种优点, 其理论和应用研究得到工程界较广泛的关注。针对目前土钉支护优化设计中计算工作量大和求解时间长的问题, 提出了将神经网络与遗传算法结合进行求解的思想, 利用神经网络学习算法建立起输入参数(优化设计变量)和输出参数(安全系数最小值)之间的非线性映射关系, 当神经网络学习达到收敛条件时, 从映射关系就极易获得遗传算法求解优化问题所需的对应于给定设计变量的安全系数最小值的近似值, 以代替每次必须进行的最小安全系数求解。算例结果表明, 采用神经网络与遗传算法结合进行土钉最小长度优化求解所需要的时间大大减少, 而且具有良好的效果。

**关键词:** 土钉支护; 优化设计; 神经网络; 遗传算法

土钉支护技术由于具有造价低、施工快速简便、支护效果好等种种优点而在基坑开挖、边坡稳定等工程中得到了越来越广泛的应用, 而土钉支护优化

设计对于进一步减少工程造价具有实际应用价值, 因而受到广泛关注。

优化设计的目的通常是在保证工程安全可靠的

基金项目: 交通部科技教育司科研资助项目

收稿日期: 2006-02-22

## 参考文献:

湖南大学, 2003.

[1] 杜运兴. 预应力 CFRP 加筋土技术的应用与研究[D].

[2] JTJ 059-95. 公路路基路面现场测试规程[S].

## A Study on Field Test of Prestressed CFRP Reinforced Earth Embankment

DU Yun-xing, SHANG Shou-ping, ZHOU Fen

(Civil Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The technology of prestressed CFRP reinforced earth is that carbon fabrics reinforced plastics (CFRP) is adopted as a material for reinforcement. Through lateral pressure is applied on sidewise soil by stretching and anchoring the end of CFRP strip, the stability and strength of the soil are improved. This technology is applied to Linxiang-Changsha Expressway. Subsidence observation and deflection tests for the test embankment are performed. The test results show that this technology can improve the rebound modulus of reinforced-earth embankment and speed up subsidence stability of reinforced-earth structure notably.

**Key words:** CFRP strip; reinforced earth; subsidence; field test