文章编号：1002-0268（2001）04-0008-04

柔性加筋土挡墙路堤在软基上的应用研究

陈 析[1]，徐啸海[2]
（1. 广东新台高速公路有限公司，广东 台山 529200；2. 铁道部科学研究院铁建所，北京 100081）

摘要：介绍在国内首次采用土工格栅建造的柔性加筋土挡墙处理在软基上填筑加高帮宽路的工程实践，以及设计计算，并阐述筋材和土体协调变形等问题。变形的主要原因是差异沉降对既有路堤的影响，采用传统的方法易留下工程的隐患。工程实践证明，采用柔性加筋土挡墙在软基上解决此类问题是成功的，且操作简便易行，并可降低工程造价，值得推广应用。

关键词：柔性加筋土挡墙；软基；差异沉降
中图分类号：U426.12 文献标识码：A

Application of Flexible Reinforced Retaining Wall Embankment in Soft Ground Treatment

CHEN Xi[1]， *XU Xiao-hai*[2]
（1. Guangdong Xin-Tai Expressway Co. Ltd.，Guangdong Taishan 529200，China；
2. Science Academy of Railway Ministry，Beijing 100081，China）

Abstract: This paper presents the application of geogrid reinforced retaining wall plus high embankment in soft ground treatment，for the first time in China，including design and calculation of the reinforcing materials and the earth block coordination and deformation. It is found that the main cause of the deformation is the impact of differential settlement on the existing embankment，therefore the traditional treatment methods usually have hidden risk. The practical engineering practice shows that the application of the flexible reinforced retaining wall in the soft ground treatment has been successful，which is easy to implement and cost effective.

Key words: Flexible reinforced retaining wall；Soft ground；Differential settlement

0 前言

柔性加筋土挡墙路堤位于新台高速公路 K61＋000～＋500，该段为软土地段，软土层厚达 4.20～9.40m。路基的土方工程已于 1999 年 10 月上旬基本完成。由于在 K61＋223 处增设一座 6m×2.5m 的人行通道涵洞，该段的路堤须加高帮宽，最高达 1.72m。

软基上处理加高帮宽路堤一直是岩土工程中的难点之一，其主要原因是由于加高帮宽土方增加的附加荷载引起的差异沉降将对既有路堤产生拉裂或塑性滑移破坏，传统的处理方法如补做排水固结处理，加人工垫层或修建圬工挡墙等都存在着种种的不足，难以消除差异沉降对路堤的影响，并且须重新征地，对工程的进度产生影响。

加筋土挡墙对筋材的技术要求较高，既要求筋材具有一定的拉伸强度，又要求拉伸变形要小，即在小应变的状态下便能发挥出较高的拉伸强度来，以匹配填料的不足。80 年代中期，由于国外新材料土工格栅的问世，弥补了筋材的不足，使加筋土技术的应用有了更广泛的范围。

对于柔性加筋土挡墙的定义，由于目前国内出版的各种加筋土规范中，对柔性加筋土挡墙和加筋路堤之间的区别没有给出明确的界限，本文只能根据《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》（JTJ017-96）条文说明中的规定：“在软土地基上一般加筋路堤的边坡坡度与一般的填土路堤边坡坡度相同，否则按加

收稿日期：2001-01-09
作者简介：陈析（1963－），男，广东顺德人，广东新台高速公路有限公司总工程师，主要研究边坡防护技术.

筋土挡墙设计”。本文报道的加筋土路堤，边坡坡度由未加筋前的 1∶1.5 变到加筋后的 1∶0.75。故按柔性加筋土挡墙进行设计与施工。

1　地质概况

该段地基土属第四纪滨海相近代沉积的软粘土，根据勘察结果。软土层自上而下分为以下几层：

1. 第一层为素填土，层厚 0.5m 左右，土黄色，由细砂质亚砂土组成，稍湿，松散状；

2. 第二层为耕植土；层厚 0.3m 左右，灰褐色或浅黄色，主要为淤泥质土或亚粘土，潮湿，可塑状；

3. 第三层为淤泥，灰色或灰黑色，细腻，含腐殖物，局部含中粗砂，饱和，流塑状，层厚 2.4～6.0m；

4. 第四层为淤泥质砂性土层，灰黑色饱和，松散状，层厚 1.90～5.70m。

软土层下为中粗砂层，粒径在 0.5～2.0m 之间，呈中密状，饱和。地下水位稳定在 1.35～1.99m。

软基采用袋装砂井进行处理，间距 1.5m，长度 6.5～10.0m，之上为 0.5m 厚的砂垫层。路基填料的最大干密度为 1.89g/cm^3，最佳含水量为 12.9%，平均膨胀量为 1.5%。*CBR* 平均值为 18%。

软土的各项物理力学指标见表 1 和表 2。从表中可以看出，软土层的天然含水量远远高于液限，压缩性高，抗剪强度低，第三层局部含有砂夹层以及第四层为淤泥质砂性土，对加速排水固结非常有利。

软土的物理试验成果指标　　表 **1**

编号	土的种类	取样深度 (m)	含水量 W (%)	液限 W_1 (%)	塑限 W_p (%)	液指 I_1	塑指 I_p	容重 r (g/cm^2)	孔隙比 e
1	淤泥	2.40～2.65	102.3	49	31	3.96	18	1.43	2.36
2	淤泥	5.50～5.75	80.2	47	29	2.85	18	1.54	2.04
3	淤泥质砂性土	6.00～6.25	44.6	29	18	2.42	11	1.72	1.27

软土的力学试验成果指标　　表 **2**

编　号	土的种类	取样深度 (m)	压缩系数 α_{1-2} (MPa^{-1})	压缩模量 Es_{1-2} (MPa)	固结系数		直接快剪	
					C_v	C_M	C (MPa)	Φ (°)
1	淤泥	2.40～2.65	2.77	1.01	5×10^{-4}	5×10^{-4}	7.3	5
2	淤泥	5.50～5.75	1.84	1.11	3.4×10^{-4}	3.4×10^{-4}	9.4	3.1
3	淤泥质砂性土	6.00～6.25	0.95	2.40	7×10^{-4}	7×10^{-4}	9.8	3.6

2　加筋机理浅析

目前，对于加筋机理的分析，岩土工程技术人员多从古典的极限平衡理论进行阐述，即假定加筋后的复合土体仍遵循摩尔-库仑强度包线的准则，见图 1。

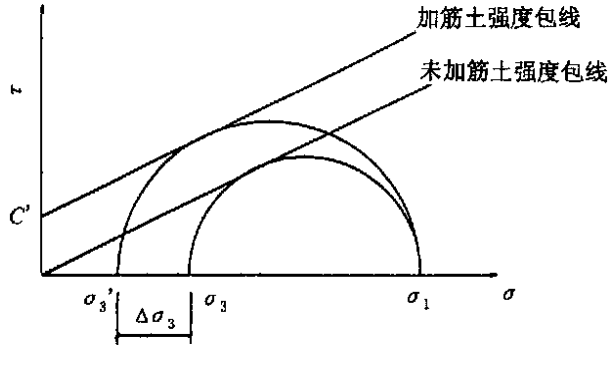

图 **1**　加筋土极限平衡应力图

天然状态下的大小主应力 $\sigma_3 \sim \sigma_1$ 处于弹性平衡状态。如果某种原因导致侧限应力 σ_3 逐渐下降减小至 σ_3'（如土体的侧胀或挡墙墙体的外移等），则土体须由弹性平衡状态发展到塑性平衡状态而出现破坏，即土体由静止土压力状态（K_0）发展到主动土压力状态（K_a）状态。欲使土体继续保持弹性平衡状态，须在土体中铺设具有一定拉伸强度的加筋材料，由于筋材和土体的界面摩阻效应，使之产生一个侧向约束力 $\Delta\sigma_3$，即相当于增大土体的抗剪强度，或相当于增大土体的称其为准粘聚力的 C'，而使土体处于稳定状态。

郎金土的极限平衡理论较好地解释了加筋材料和土体的摩阻效应产生的侧限约束力的加筋机理，但仍不全面，对另一个经过工程实践所证明的加筋机理-应力扩散作用尚未加以说明。如长沙交通学院在柔性桥台模型和试验工程结构的研究中，采用有限元方法得出，台帽局部荷载在加筋体中的扩散角分别为：模型结构 $\theta=41.2°$；试验工程结构，有挡墙的加筋体 $\theta=26.6°$，反包的加筋体 $\theta=34.1°$。由于加筋土体的应力扩散作用，可改变加筋土体的受力状态。故加筋后增加的抗剪强度，即增加的准粘聚力 C'应是侧向

约束力和应力扩散两种加筋机理共同作用的结果。

由于加筋土其筋材和土体界面的相互作用是非常复杂的，目前的理论研究尚不充分。笔者认为，应在目前加筋机理研究的基础上，更深一层地研究加筋材料和土体的相互水平变形的协调问题。从力学性质上说，筋材具有较高的拉伸强度而不具有抗压能力，土体具有较高的抗压强度而抗拉能力很弱，筋材和土体的结合，较好地弥补了二者的不足，使加筋土体具有较高抗压强度的同时也增加了复合土体的抗水平变形的能力。从设计的角度上说，加筋材料设计拉伸强度都留有较大的余量。如国内的相关规范规定，一般取筋材延伸率 5％～10％时的拉伸强度作为设计抗拉强度；欧美等国则根据机械磨损、化学腐蚀、蠕变性能和生物破坏及地层温度等影响因素进行折减，其折减系数一般在 2.2～7.6 之间。故加筋土体的破坏一般都源于土体水平位移导致抗剪强度不足而产生的骤然破坏引起的局部应力过大而使筋材破坏。室内试验和现场工程都证明了这一现象。如铁四院在广珠线软土路堤试验采用 3 层土工织物作为软土地基加固。填土高达 7.56m 时，表层、中层和底层的土工织物，其应变分别为 4.0％、2.3％和 6.5％。其抗拉强度分别为 8kN/m^2，4.6kN/m^2 和 13kN/m^2，总共只发挥了抗拉强度的 17％，连云港软土路堤试验段破坏时测得的土工织物的延伸率为 15％（极限抗拉强度时延伸率大于 24％）。

工程实践和室内试验证明，在加筋土筋材的选用上，应选择小应变时便能发挥较大拉伸强度且摩阻性能好的材料，加筋效率会更明显些。

总之加筋机理应着重于在不同荷载条件下不同类型筋材和不同种类土体的水平变形协调问题的研究，进一步提出比较实用的设计参数，使加筋机理的研究具有更大的实用性和经济性。

3　设计计算

加筋技术是岩土工程近年来发展的一个分支，故在设计计算中仍可沿用岩土力学的方法去解决，设计计算内容包括 2 项，一是柔性加筋土挡墙的验算，包括外部稳定验算（包括抗水平滑移稳定验算，抗倾覆验算和深层滑弧稳定验算）和内部稳定验算（包括水平拉力和抗拔稳定验算）；二是软基验算（包括深层滑弧稳定验算和沉降计算）。

柔性加筋土挡墙和软基验算都包括深层滑弧稳定验算，验算结果，稳定安全系数在 1.34～1.77 之间，满足规范和设计要求。

柔性加筋土挡墙的验算和相关参数见图 2。

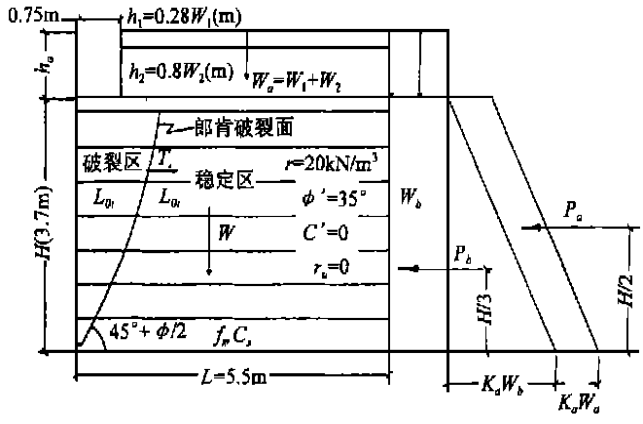

图 2　柔性加筋土挡墙验算示意图

设计选用的筋材型号为 SS20，设计拉伸强度为 5％延伸率时的抗拉强度 14kN/m^2。筋材间隔 0.5m，主筋总长 5.5m，次筋 2.0m，汽-20 换算的等代荷载 5.6kPa，相当于 0.28m 土柱高。路面结构换算的土柱高为 0.8m，墙高 3.7m，为便于计算，并偏于安全，1∶0.75 坡面假设为垂直坡面。考虑到路堤高度不足 4m，故加筋层间距按相同间隙进行处理。

3.1　抗水平滑移稳定验算

抗水平滑移按均布超荷载进行稳定验算，见下式

$$F_1=\frac{\sum \text{抗水平滑移力}}{\sum \text{水平滑移力}}=\frac{(W_a+W+W_b)f_s+C\cdot L}{P_a+P_b}\geqslant 1.5 \qquad (1)$$

式中，W_a——均布超荷载总和；

W——加筋土挡墙荷载总和；

W_b——墙背填土土压力的垂直荷载；

C——地基土的粘聚力；

f_s——地基土的摩擦系数；

L——筋材总长；

P_a——均布超荷载引起的水平土压力；

P_b——墙背填土水平土压力。

3.2　抗倾覆验算

抗倾覆验算是以墙趾为转动中心，按均布荷载进行计算，见下列公式

$$F_2=(\sum \text{抗倾覆力矩})/(\sum \text{倾覆力矩})=\frac{(W_a+W)\cdot L/2+W_b\cdot L}{P_a\cdot H/2+P_b\cdot H/3}\geqslant 2.0 \qquad (2)$$

式（2）中的符号和式（1）相同。

3.3　水平拉力强度验算

抗水平拉力主要验算铺设在不同深度处土层中的筋材能否在土体荷载侧向力的作用下断裂，筋材在每

层土层中所承受的水平拉力可按下式计算

$$T=[(\sigma_{vi}+\sum\Delta\sigma_{vi})K_a+\Delta\sigma_{hi}]\cdot S_x\cdot S_y \quad (3)$$

式中，σ_{vi} 为筋材层所承受的上覆土自重压力；$\sum\Delta\sigma_{vi}$ 为超载引起的垂直附加压；$\Delta\sigma_{hi}$ 为水平附加荷载；S_x 为筋材水平间距；S_y 为筋材垂直间距；K_a 为主动土压力系数。

设计给出的筋材抗拉强度 T_a 应满足下式的要求

$$T_a/T_i\geqslant 1$$

3.4　抗拔稳定验算

筋材抗拔力主要验算锚固区域内筋材有效长度 L_c 与周围土所产生的摩阻效应和破坏区域的土体相平衡。土工格栅作为筋材和周围土体的相互作用，其受力状态远比土工带要复杂，除筋材肋板和土体的界面摩擦外，由于网眼效应，尚有土与土界面的摩擦力以及筋材横肋产生的被动土压力，其综合效应产生的摩擦角称其为似摩擦角。由于影响摩擦系数的因素较多，故摩擦系数的取值比较困难，一般根据现场情况进行室内试验进行取值，其计算公式如下

$$T_{pi}=2\sigma_{vi}\cdot B\cdot L_{ei}\cdot C_e\cdot f \quad (4)$$

式中，σ_{vi} 为筋材上的有效法向应力，kPa；f 为筋材与土的摩擦系数；L_{ei} 为锚固区域内的有效加筋长度，m；B 为筋材宽度，m；C_e 为与有效加筋长度有关的折减系数。

抗拔稳定安全系数应满足下式

$$F_a=T_{pi}/T_i>1.5\sim 2.0$$

4　施工要点

柔性加筋土挡墙施工质量是至关重要的环节，施工中应保证每道施工工艺按照设计和规范的要求实施。

（1）加筋土施工时，应对每层加筋层进行边线和层高测量，尤其底层边线要测量准确，一则保证路肩宽度，二则保证边坡的平顺性；层高测量要控制填土厚度，以保证筋材强度的有效发挥。

（2）本次施工底层采用二种填料，碎石和中粗砂。南方雨水多，地下水位高，从施工效果看，碎石做底垫层效果要好些，但造价偏高；但从保证工程质量来看，选用碎石作底层筋材填料较为合宜。

（3）加筋路堤施工，路肩处的填土压实度必须保证达到设计要求，机械碾压不易达到处，应人工夯实，但应尽量使用机械碾压，否则易留下工程隐患。

（4）尽量避免在雨季施工。如为保证施工进度须在雨季施工，应采取相应的防护措施；如在已完工的加筋土坡面覆盖塑料薄膜，或在加筋土表层两侧边缘处堆土防水冲刷等。

（5）已摊铺的土工格栅，不能让重车通过，避免人为的机械损坏筋材，从而减弱筋材的加筋效果。

（6）反包后的次筋应摊铺平整，人工拉紧后，应在距边沿处0.5～1.0m处用U形钉固定，边坡处要平顺，必要时人工整平。

（7）铺设的筋材预先张拉会协调土的变形增加加筋效果，但目前技术尚达不到。主要是因为采用人力张拉后，用U形钉固定时筋材反弹，张拉应力消失，未能达到张拉的效果。应设法采用机械张拉，但张拉反力是值得探讨的问题。

（8）严禁在已完工的加筋土坡面滚落石块等重物，以免损坏筋材，影响加筋质量。如下道工序需要，应采取相应的防护措施。

5　结束语

加筋土是岩土工程中的一门新技术，从法国人维达尔1968年采用镀锌钢带修建第一座加筋土挡墙至今，只有30余年的历史，但由于它的施工简便性和经济性，发展很快。国内加筋土挡墙技术由于受筋材的限制（筋材多为各种类型的土工带），修建的多为刚性加筋土挡墙，有关柔性加筋土挡墙鲜见报道，而在软基上采用双向土工格栅作为筋材的柔性加筋土挡墙修建加高帮宽路堤，国内尚未见相关报道。

通过本次工程实践，证明采用柔性加筋土挡墙处理此类问题是成功的，柔性加筋土挡墙属于柔性结构，能较好地适应软基的变形。从施工工艺的角度来说，比刚性加筋土挡墙施工更为简便和经济。加上能绿化环境，美化环境，节省国土资源，施工操作简便易行，并降低工程造价，应是加筋土新技术发展的方向之一。

参考文献：

[1] 中华人民共和国交通部. 公路加筋土工程设计规范. 人民交通出版社，1992.

[2] 中华人民共和国交通部. 公路软土地基路堤设计与施工规范. 人民交通出版社，1997.

[3] 中华人民共和国交通部. 公路土工合成材料应用技术规范. 人民交通出版社，1999.

[4] 中华人民共和国水利部. 土工合成材料应用技术规范. 中国计划出版社，1999.

[5] 周志刚等. 柔性桥台的研究综述专题文献. 1998.

[6] UK. Netlon Limited: The Design of Reinforced Soil Structures Using Tensar Geogrids. 1996-05.

[7] UK. Netlon Limited: Guidelines for the design and construction of reinforced soil retaning wall using 'Tensar' geogrids. 1996.