



土工格栅和劲性复合桩在挡墙中的联合应用

罗 浩

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要: 对于物理特性较差的软弱土层地基, 上部挡墙常面临抗滑和地基承载力不足的问题。传统预制桩和灌注桩方案经常面临工程周边房屋安全、居民噪音投诉、造孔泥浆外排的环保压力等情况, 且难以满足工期和造价要求。针对上述问题, 分别从挡墙结构抗滑和地基承载力两方面进行分析。加筋土中的土工格栅可以全部或部分承受土水平力, 劲性复合桩可以提高地基承载力。在软土地基挡墙设计中, 提出土工格栅加筋土和劲性复合桩联合防护的新思路, 并进行完整的设计计算分析。结果表明, 两者结合既能满足挡墙抗滑稳定性要求, 又可保证地基承载力要求。土工格栅和劲性复合桩联合方案既便于施工又能节省工程投资。研究成果对软土地基挡墙设计和施工具有借鉴意义。

关键词: 土工格栅; 劲性复合桩; 加筋土; 软土地基; 挡墙

中图分类号: U655.4; TU476+.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0233-05

Combined application of geogrid and strength composite piles in retaining wall

LUO Hao

(Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: For the soft soil foundation with poor physical properties, the upper retaining wall often faces the problems of anti-sliding and insufficient bearing capacity of the foundation. Traditional prefabricated pile and cast-in-place pile schemes often face problems such as the safety of buildings around the project, residents' noise complaints and environmental pressure from the discharge of drilling mud. Moreover, the construction period and cost requirements are high and cannot be guaranteed. In view of the above problems, the anti-slide of retaining wall and the bearing capacity of foundation are analyzed respectively. The geogrid in the reinforced soil can bear all or part of the horizontal force of the soil and the strength composite piles can improve the bearing capacity of the foundation. In the design of retaining wall on soft soil foundation, a new idea of combined protection of geogrid and strength composite piles is put forward and a relatively complete design calculation and analysis is carried out. The results show that the combination of the two can not only meet the anti-sliding stability of the retaining wall but also ensure the bearing capacity of the foundation. The combined scheme of geogrid and strength composite piles is convenient for construction and can save engineering investment. The research results have reference significance for the design and construction of retaining wall on soft soil foundation.

Keywords: geogrid; strength composite pile; reinforced earth; soft soil foundation; retaining wall

土工格栅等土工合成材料广泛应用于水利水电工程, 起到加筋、反滤、排水、防渗和防护等作用。加筋土的概念和设计理论由法国工程师 Henri. Vidal 于 20 世纪 60 年代提出, 随后在全世界得到初步推广。加筋土是在土中埋设抗拉强度

较高的材料(如土工格栅、土工织物等)而形成的一种复合体, 其基本原理为土与加筋材料之间存在似摩擦作用, 限制了土的变形, 从而提高了土体的抗剪强度^[1-5]。加筋土结构具有占地少、地形适用性强、抗震性能好和造价低廉的优点, 较其

收稿日期: 2025-02-05

作者简介: 罗浩(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程设计。

他结构物可节约投资 40%~60%。

劲性复合桩是将散体材料桩、柔性水泥土类桩和刚性混凝土桩根据不同的地基土质选择相应的组合而形成的一种复合桩型,在淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、砂土及人工填土等地基处理中得到较好的应用。劲性复合桩结合了刚性混凝土桩和水泥土拌合桩的优点,在提高软土地基承载力、控制变形沉降方面,有其独特的优势^[6-8]。本文结合某工程挡墙,提出并分析土工格栅和劲性复合桩在挡墙软土地基中的新型联合处理方案,以解决挡墙滑移力过大和地基承载力不足的问题。

1 基本原理

1.1 土工格栅加筋土

加筋土工作原理目前有 2 种基本解释,分别为摩擦加筋理论和准黏聚力理论。加筋土与无筋土相比,内摩擦角不变,而黏聚力有所提高,其计算式为:

$$c' = c + \frac{R_T \tan(45^\circ + \varphi/2)}{2\Delta H} \quad (1)$$

式中: c' 为土加筋后的黏聚力, kPa; c 为原状土的黏聚力, kPa; φ 为土的内摩擦角, ($^\circ$); R_T 为土工格栅的单宽抗拉强度, kN/m; ΔH 为土工格栅的竖向间距, m。

1.2 劲性复合桩复合地基

根据 JGJ/T 327—2014《劲性复合桩技术规程》有关条文,劲性复合桩复合地基承载力特征值按

下式计算:

$$f_{\text{spk}} = \lambda m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{\text{sk}} \quad (2)$$

式中: f_{spk} 为复合地基承载力特征值, kPa; λ 为单桩承载力发挥系数, 取 0.95~1.00; m 为面积置换率; R_a 为单桩竖向抗压承载力特征值, kN; A_p 为桩的截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力发挥系数, 取 0.80~1.00; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值, kPa。

劲性复合桩桩侧破坏面可能位于内、外芯界面或外芯和桩周土界面,不同的破坏形式对应的单桩竖向抗压承载力特征值计算原理亦不同^[9]。对于式(2)中的 R_a ,上述两种破坏形式对应的计算公式见 JGJ/T 327—2014《劲性复合桩技术规程》4.3.2 节,并取两者中的小值。

2 挡墙形式及工程地质

2.1 挡墙形式

工程挡墙位于长江三角洲平原区,紧邻长江,为钢筋混凝土悬臂式结构,墙顶高程 3.00 m,底板顶高程-2.00 m,底板底高程-2.80 m,宽 6.00 m。

2.2 工程地质

挡墙底板直接坐落于②₁层粉质黏土上。现场钻孔显示,挡墙地基土质从上至下依次为②₁粉质黏土和③₂砂质粉土。工程区Ⅱ类场地基本地震动峰值加速度为 0.05g,相应的地震基本烈度为 6 度。墙后回填土料采用①_B砂质粉土。根据地勘报告,各土层工程地质参数建议值见表 1。

表 1 各土层工程地质参数建议值

Tab. 1 Recommended values of engineering geological parameters for each soil layer

土层 层号	厚度/ m	土粒 比重	孔隙比	重力 密度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	直接快剪 黏聚力 c_q / kPa	直接快剪 内摩擦角 φ_q /($^\circ$)	固结快剪 黏聚力 c_{cq} /kPa	固结快剪 内摩擦角 φ_{cq} /($^\circ$)	允许 承载力/ kPa	挡墙基底与 地基间的 摩擦系数	搅拌桩土的 侧阻力特征值/ kPa
① _B	-	2.70	0.817	17.85	6.60	20.00	6.60	21.00	-	-	-
② ₁	5.30	2.72	0.905	18.44	16.00	10.50	17.50	14.60	60.00	0.20	8.00
③ ₂	12.70	2.70	0.745	18.93	6.30	25.20	6.50	25.90	140.00	0.38	20.00

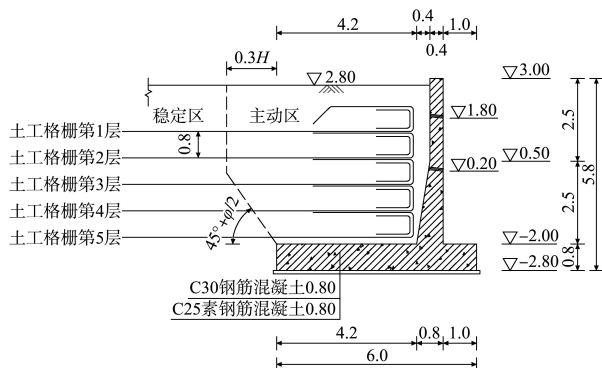
3 稳定计算

3.1 挡墙荷载及稳定分析

挡墙的主要荷载包括自重、土压力、水压

力和扬压力等,由于工程区域地震基本烈度为 6 度,故可不考虑地震工况,分别按照低水位和完建期 2 个工况设计,根据水文资料,墙前低水位

为-0.82 m。挡墙断面稳定分析见图 1。



注：H 为加筋土体的高度。

图 1 挡墙断面稳定分析 (单位: m)

Fig. 1 Stability analysis of retaining wall section (unit: m)

3.2 内部稳定计算

3.2.1 土工格栅强度

根据 JTS/T 148—2020《水运工程土工合成材料应用技术规范》^[10] 有关条文, 土工格栅承受的水平拉力计算公式如下:

$$T_i = [(\sigma_{vi} + \sum \Delta \sigma_{vi}) K_i + \Delta \sigma_{hi}] s_{vi} / A_r \quad (3)$$

式中: T_i 为第 i 层单位墙长加筋材料承受的水平拉力, kN/m; σ_{vi} 为验算层筋材所受土的垂直自重压力, kPa; $\sum \Delta \sigma_{vi}$ 为荷载引起的垂直附加压力, kPa, 施工期取 10 kPa, 运行期取 5 kPa; K_i 为土压力系数, 当 $h_i \leq 6$ m 时, $K_i = K_0 (1 - h_i/6) + K_a h_i/6$, 当 $h_i > 6$ m 时, $K_i = K_a$, 其中 K_0 为静止土压力系数, K_a 为主动土压力系数, h_i 为墙顶至第 i 层加筋材料的距离; $\Delta \sigma_{hi}$ 为水平附加荷载, kPa, 不存在时则取 0; s_{vi} 为筋材垂直间距, m; A_r 为筋材面积覆盖率, 对于筋材满铺的情况取 1。

3.2.2 土工格栅抗拔计算

土工格栅的抗拔计算主要是为了确定其锚固长度, 确保受力时不发生拔出破坏。根据 JTS/T 148—2020《水运工程土工合成材料应用技术规范》有关条文, 土工格栅锚固长度计算公式如下:

$$L_{pi} = K_{gp} \frac{T_i}{2\gamma h_i \tan \varphi_{sg}} \quad (4)$$

式中: L_{pi} 为第 i 层土工格栅的锚固长度, m; K_{gp} 为土工格栅抗拔安全系数, 取 2; T_i 为土工格栅每延米所受拉力, kN/m; γ 为土的重力密度, kN/m³;

φ_{sg} 为土工格栅与填料的视摩擦角, (°), 当无试验资料时可取填料内摩擦角的 0.6~0.8。

土工格栅设计长度的计算公式为:

$$L_i = L_{ai} + L_{pi} \quad (5)$$

式中: L_i 为第 i 层土工格栅的设计长度, m; L_{ai} 为第 i 层土工格栅的主动区内的长度, m。

根据式(3)求得土工格栅在低水位和完建期的各层水平拉力, 根据式(4)、(5)求得土工格栅在低水位和完建期的各层锚固长度和设计长度, 见表 2。

表 2 土工格栅内部稳定计算成果

Tab. 2 Internal stability calculation results of geogrid

工况	i	h_i/m	$T_i/(kN \cdot m^{-1})$	L_{pi}/m	L_{ai}/m	L_i/m
低水位	1	1.60	32.03	4.27	6.54	10.81
	2	2.40	21.97	1.95	6.54	8.49
	3	3.20	27.40	1.83	6.54	8.37
	4	4.00	32.32	1.73	6.04	7.76
	5	4.80	36.72	1.63	5.49	7.12
施工期	1	1.60	37.84	5.31	6.54	11.85
	2	2.40	24.98	2.34	6.54	8.88
	3	3.20	30.53	2.14	6.54	8.68
	4	4.00	35.57	2.00	6.06	8.06
	5	4.80	40.10	1.88	5.50	7.38

根据表 2 计算成果, 土工格栅选择标称抗拉强度不低于 160 kN/m, 为便于铺摊和施工, 每层设计长度均取 13.00 m。

工程采用单向土工格栅, 主强度方向为垂直墙面方向。主强度方向的拼接强度不得低于土工格栅自身抗拉强度。土工格栅铺设时应拉紧、铺平, 不得有褶皱, 并应立即填筑铺填料; 填料必须分层回填和碾压, 分层厚度宜为 20~30 cm; 回填至设计分层位置时, 须回包土工格栅, 回包至上层土工格栅的水平长度不宜小于 2.00 m, 并在回包头部设土工布包裹, 土工布包裹的水平长度不小于 1.00 m; 回包土工格栅后, 应对近墙面的空隙及时进行人工回填, 并采用轻型机械压实。

3.3 外部稳定计算

3.3.1 结构稳定计算

根据表 1 和土工格栅选型参数, 求得挡墙墙后回填土加筋后的黏聚力, 见表 3。根据加筋土物理特性参数, 求得挡墙抗滑、抗倾稳定参数, 见表 4。

表 3 挡墙墙后加筋土计算值

Tab. 3 Calculation values of reinforced soil behind retaining wall

层号	直接快剪		固结快剪		加筋土直接快剪		加筋土固结快剪	
	c_q/kPa	$\varphi_q/(\text{^\circ})$	c_{cq}/kPa	$\varphi_{cq}/(\text{^\circ})$	c'_q/kPa	$\varphi'_q/(\text{^\circ})$	c'_{cq}/kPa	$\varphi'_{cq}/(\text{^\circ})$
① _B	6. 60	20. 00	6. 60	21. 00	42. 30	20. 00	42. 98	21. 00

表 4 挡墙结构稳定计算结果

Tab. 4 Stability calculation results of retaining wall structure

工况	抗滑稳定安全系数	抗滑稳定安全系数允许值	抗倾安全系数	抗倾安全系数允许值	地基应力最大值/kPa	地基应力最小值/kPa
低水位	1. 36	1. 30	2. 83	1. 50	75. 25	70. 36
施工期	2. 38	1. 15	5. 18	1. 40	103. 57	74. 66

由表 4 可知,挡墙抗滑和抗倾稳定满足规范要求,说明采用回填土中加土工格栅的设计方案可行。但由于挡墙基础坐落于②₁ 粉质黏土上,该层地基承载力为 60 kPa,不满足挡墙承载力要求,拟采用劲性复合桩方案进行地基处理。

根据挡墙稳定计算成果,其在完建期竖向应力最大,达到 103. 57 kPa。结合 JGJ/T 327—2014《劲性复合桩技术规程》有关条文规定和挡墙场地实际情况,劲性复合桩采用等芯柔刚复合桩,外层采用直径 700 mm 的水泥土搅拌桩,水泥掺入量为 20%,桩身水泥土的 28 d 抗压强度不小于 1. 20 MPa,外层为柔性桩;桩体内芯为直径 220 mm 的素混凝土桩,标号为 C30,为刚性桩;桩长 8. 00 m,间距 1 800 mm×1 800 mm。由挡墙所在位置地层参数可知,桩身穿过②₁ 层、深入③₂ 层。根据式(2)计算,劲性复合桩复合地基承载力特征值为 106. 96 kPa,而最大基底应力为 103. 57 kPa,说明劲性复合桩布置方案满足地基设计要求。

3. 3. 2 整体稳定计算

根据加筋土物理特性参数,采用瑞典圆弧法求得挡墙整体抗滑稳定安全系数,结果见表 5。由表可知,挡墙整体抗滑稳定满足规范要求,说明采用回填土中加土工格栅的设计方案可行。

表 5 挡墙整体稳定计算结果

Tab. 5 Overall stability calculation result of retaining wall

工况	整体抗滑稳定安全系数	整体抗滑稳定安全系数允许值
低水位	1. 85	1. 25
施工期	1. 44	1. 15

劲性复合桩施工前应进行成桩工艺试验,数量不少于 3 根。劲性复合桩施工工艺流程为:定

位放线→桩位复核→水泥搅拌桩桩机就位→水泥搅拌桩施工→水泥搅拌桩桩机移位至下一根桩→预制桩桩机就位→桩位复核→预制桩施工→成桩。沉桩过程中,应采取可靠措施,减小对已成搅拌桩的扰动。劲性复合桩各单桩桩位与施工图的允许偏差不得大于 10 mm,每根桩施工的垂直度偏差不超过桩长的 1%。预制桩施工应在搅拌桩成桩 6 h 内进行,预制桩施工前必须重新测量放样并复核桩位,确保预制桩桩位测量误差小于 10 mm。经工程现场实际监测,施工期结束,挡墙未发生水平滑移,竖向沉降为 6. 7 cm,满足相关规范要求,证明挡墙的土工格栅和劲性复合桩联合设计方案可行。

4 结语

1) 结合土工格栅加筋土和劲性复合桩理论,提出两者联合的设计方案,并阐述了相对完整的设计内容和计算方法。

2) 通过设计计算,选取合适强度和长度的土工格栅,可满足软土地基中挡墙抗滑稳定要求;通过劲性复合桩参数设计,挡墙地基承载力提升约 78%,大于基底应力最大值。

3) 根据现场施工和监测反馈,挡墙未发生水平滑移,沉降满足规范要求,整个施工期间工程周边房屋安全,没有出现居民投诉现象,节省了造孔泥浆外排的行政审批环节,缩短了工期,方案效益较为明显。

4) 对于加筋土准黏聚力理论,本文仅考虑了黏聚力方面的提升效果,实际上其在内摩擦角方

面亦有所增强,故本文设计计算成果偏保守,尚待后续进一步研究。

参考文献:

- [1] 雷胜友. 现代加筋土理论与技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- LEI S Y. Theory and technology of modern reinforced soil [M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [2] 杨果林, 彭立, 黄向京. 加筋土结构分析理论与工程应用新技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- YANG G L, PENG L, HUANG X J. Analysis theory of reinforced soil structure and new technology of engineering application [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [3] 徐光黎, 刘丰收, 唐辉明. 现代加筋土技术理论与工程应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004.
- XU G L, LIU F S, TANG H M. Theory and engineering application of modern reinforced soil technology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004.
- [4] 王娅娜. 悬臂式挡土墙力学特性及结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- WANG Y N. Research on the mechanical properties and structure optimization of cantilever retaining wall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [5] 付长生, 陈璐, 陶小虎. 某新型土工格栅加筋土挡墙的设计方法[J]. 水运工程, 2012(3): 30-34, 72.
- FU C S, CHEN L, TAO X H. Design of new-type geogrid reinforced retaining wall[J]. Port & waterway engineering, 2012(3): 30-34, 72.
- [6] 李立业. 劲性复合桩承载特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- LI L Y. Study on the bearing capacity of stiffened DCM pile[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [7] 钱于军, 许智伟, 邓亚光, 等. 劲性复合桩的工程应用与试验分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 998-1001.
- QIAN Y J, XU Z W, DENG Y G, et al. Engineering application and test analysis of strength composite piles[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2013, 35(S2): 998-1001.
- [8] 李立业, 刘松玉, 章定文, 等. 劲性复合桩承载力计算方法探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 43-47.
- LI L Y, LIU S Y, ZHANG D W, et al. Bearing capacity calculations of strength composite piles [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2015, 11(S1): 43-47.
- [9] 劲性复合桩技术规程: JGJ/T 327—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Technical specification for strength composite piles: JGJ/T 327-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [10] 水运工程土工合成材料应用技术规范: JTS/T 148—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Technical code for application of geosynthetics for port and waterway engineering: JTS/T 148-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.

(本文编辑 王传瑜)

声 明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动,他们建立伪网站,利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明,从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿邮箱网址: www.sygc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

《水运工程》编辑部