水利工程 CFG 桩复合地基及施工方法论

朱灿明

常州南天建设集团有限公司，江苏常州，213100；

摘要：一种水利工程 CFG 桩复合地基及施工方法，所述复合地基包括嵌入式褥垫层、CFG 桩、桩端持力层，嵌入式褥垫层包括由上至下依次设置的水泥土层、粗粒料加筋垫层、碎石置换层，粗粒料加筋垫层中布置加筋材料，所述粗粒料加筋垫层铺设在 CFG 桩和碎石置换层上部，所述碎石置换层为 CFG 桩的桩顶高程以下一定范围的软土层采用碎石置换形成。本方法的的褥垫层在以往的碎石层结构型式的基础上，采用了嵌入式设计，垫层上方为防渗水泥土层，垫层下方为碎石加筋材料，桩顶以下一定厚度的桩间土采用碎石置换层设计。本嵌入式 CFG 桩复合地基具有优化复合地基承载力模式、降低桩土应力比、促进软基排水固结以及提高褥垫层防渗性能的作用。

关键词：水利工程；CFG 桩复合地基；施工方法

DOI：10.69979/3060-8767.25.03.011

1 背景技术

随着经济发展，水利建设标准的提高和建设周期的不断缩短，使得地基的沉降和稳定控制标准越来越严，传统的以排水固结、堆载预压为主的地基处理措施和以挤密砂桩、碎石桩为主的散体桩复合地基处理方法已难以适应工程需求。CFG(Cement Fly-ashGravel，水泥粉煤灰碎石)桩具有较高的刚度和粘结强度，使它在复合地基的承载和变形特性方面表现出一定的特殊性，被称为刚性桩复合地基，在工程中的应用越来越多。

在上部荷载作用下，褥垫层-CFG 桩-桩间土-下卧层共同作用才能形成复合地基，褥垫层设置在上部基础底部和 CFG 桩顶之间，通常采用砂石或碎石等散体材料，主要作用是使桩能够产生一定的上刺，桩间土能够受力，保证桩、土共同承担荷载，协调桩土应力比，且褥垫层的散体性对上部结构传递下来的水平荷载也能起到解耦作用，消除水平荷载对 CFG 桩体的不利影响。但因褥垫层的散体性，其抗渗性难以满足水利工程对地基的防渗要求，限制了 CFG 桩复合地基在水利工程中的推广应用。

CFG 桩复合地基应用在软土地基处理中时，因桩顶平面处桩间软土层的承载力低、变形大、易扰动等特性，采用传统的单一散体材料作为褥垫层时，在上部附加荷载作用下，桩间软土的沉降远大于 CFG 桩体，势必造成桩体受力大，桩间土受力越来越偏，导致桩土应力比偏高，影响 CFG 刚性桩复合地基承载力的发挥，当软土层较薄，CFG 桩桩端坐落在较硬岩层上为浅埋岩端承桩时，该现象更为明显。

目前，类似的 CFG 桩褥垫层的的类型主要有以下几种：①专利 CN202110959690.3 中所述的在粗粒料加筋垫层和刚性基础之间设置钢筋混凝土防渗层和挡水件，主要用于阻挡雨水等地表水侵蚀褥垫层造成的垫层砂土流失，其防渗措施成本高，技术难度大，仅能用于防止地表水的入渗。②专利 CN201922068288.7 中所述褥垫层本体由刚性褥垫层和柔性褥垫层组成，刚性褥垫层位于柔性褥垫层的上端，柔性褥垫层与桩间土之间设置有防渗土工膜，基础底面与混凝土浇筑层之间设置有钢筋网，主要用于确保预刺入垫层能够承受更大的压力，对提高复合地基承载作用的效果较明显，但通过在桩间土和柔性垫层之间铺设防渗土工膜起到防渗作用的技术难度较大，主要原因为刚性桩与桩间土的变形不协调，防渗膜容易刺入破损，且膜与桩周的密封性施工难度也大，防渗效果难以保证。③专利 CN201320683070.2 中所述 CFG 桩褥垫层在桩体之间的区域填充粘性土，在褥垫层位于桩体顶端的区域填充有水泥土，主要作用是满足水利工程地基防渗要求，可为工程建设节省投资，但难以起到协调桩土应力比的作用，且在上附荷载作用下，桩间土一旦发生开裂，地基的防渗功能难以满足要求。④专利 CN201710242901.5 中所述变刚度加筋材料包括砂石层、粗粒料加筋垫层和水泥稳定碎石层，主要作用为刚性桩复合地基处理软土地基时，起到分层次调节加筋材料刚度，达到充分发挥桩间土的承载力的作用，但

不能起到防渗效果，且当桩间软土沉降较大时，桩土协调作用会明显减弱。

2 技术方案

针对 CFG 桩复合地基已有的褥垫层的不足，提供了一种水利工程 CFG 桩复合地基及施工方法，其中褥垫层采用由水泥土层、粗粒料加筋垫层及桩间土置换碎石层组成的嵌入式防渗褥垫层结构，既可以加速桩间软土层的排水固结，提高桩间土的地基承载力，确保桩土应力比在合适范围，充分发挥复合地基承载作用，又可以满足地基防渗要求。该技术施工工艺简单、质量可控，为工程建设节省投资，经济和环境效益显著。

所要解决的技术问题是通过如下技术方案实现的：

一种水利工程CFG桩复合地基，包括嵌入式褥垫层、CFG 桩、桩端持力层，所述嵌入式褥垫层包括由上至下依次设置的水泥土层、粗粒料加筋垫层、碎石置换层，所述粗粒料加筋垫层中布置加筋材料，所述粗粒料加筋垫层铺设在 CFG 桩和碎石置换层上部，所述碎石置换层为CFG桩的桩顶高程以下一定范围的软土层采用碎石置换形成，CFG 桩桩顶嵌入碎石置换层中，且碎石置换层的顶部与 CFG 桩的桩顶高程一致，所述 CFG 桩的下部为桩端持力层。

进一步的，所述水泥土层的厚度应满足 60%桩径≥厚度≥10cm，水泥土掺灰量 6～15%。

进一步的，所述加筋材料为土工格栅，铺设在粗粒料加筋垫层的中部或底部。

进一步的，所述土工格栅为双向抗拉土工格栅。

进一步的，所述碎石置换层的厚度为 0.3m～1.0m，所述碎石置换层中碎石的最大公称粒径不大于2/3碎石置换层厚度和 30cm 两者的小值。

进一步的，所述水泥土层的厚度为 0.1cm～0.3cm，填筑后回填土的压实系数不小于 0.97。

进一步的，所述粗粒料加筋垫层的夯填度不小于 0.9。

一种如上所述水利工程CFG桩复合地基的施工方法，包括如下步骤：

步骤一、CFG 桩施工：整平场地至桩顶设计高程，放线确定好桩位，进行 CFG 桩施工，施工深度应满足设计要求；

步骤二、碎石置换层施工：CFG 桩施工完成并达到 70%设计强度后，开挖 CFG 桩桩顶设计高程以下一定范围软土层，进行碎石置换层压实回填，压实机械采用小型夯实机或人工夯实，压实过程中应确保桩土安全稳定；

步骤三、碎石置换层施工：至 CFG 桩的桩顶高程以下 0.3～1.0m 的软土层采用碎石换填，换填后碎石层的压实度应满足设计要求，碎石最大公称粒径应不大于 2/3 碎石置换层厚和 15cm 两者的小值；

步骤四、粗粒料加筋垫层施工：将粗粒料加筋材料铺设在桩顶高程以上，粗粒料加筋材料包括粗粒料、土工格栅，粗粒料加筋材料的厚度为 0.2m～0.3m，粗粒料采用中粗砂、砂石料及碎石料，最大粒径应不大于 20mm，土工格栅为双向抗拉土工格栅；格栅铺设应平整、顺直，所述粗粒料加筋材料分层碾压，桩顶与格栅之间的垫层为第一层，密实后铺设双向抗拉土工格栅，格栅铺设应平整、顺直，格栅铺设完成后进行格栅上部的粗粒料层施工，并进行压实整平，碾压后夯填度不小于 0.9；

步骤五、水泥土层施工：选择渗透系数满足要求的土样，风干后按照设计要求的掺灰比将进行土与水泥拌合均匀，再掺水至最优含水率的±2%，静碾碾压时候后水泥土压实度应不小于 97%，7d 后强度不低于设计抗压强度。

进一步的，所述碎石置换层通过以下两种方式施工：①先打 CFG 桩，在桩体强度达到设计强度 70%后，开挖桩侧软土层至设计碎石置换层厚度；②先将至桩顶高程以下碎石置换层厚度范围内的软土碎石置换层置换成满足压实要求的碎石层，再进行 CFG 桩施工。

进一步的，所述土工格栅采用高强聚丙烯带进行缝接，搭接宽度不小于 25cm，并用“U”形钉予以固定。

3 附图说明

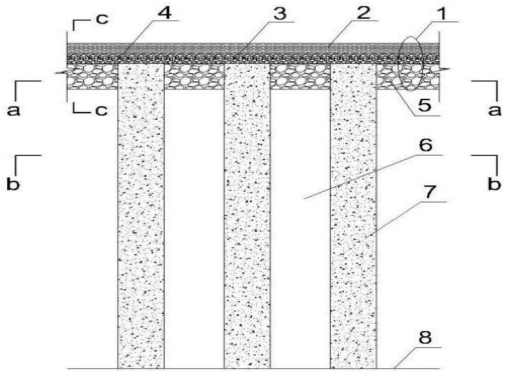

图 1 水利工程 CFG 桩复合地基的断面图；

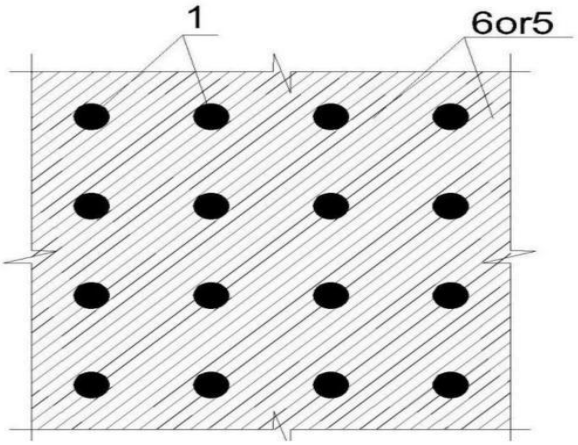

图 2 水利工程 CFG 桩复合地基的横剖面图；

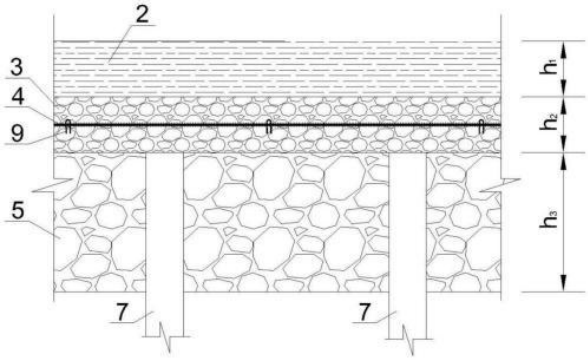

图 3 是 CFG 桩复合地基的剖面图；

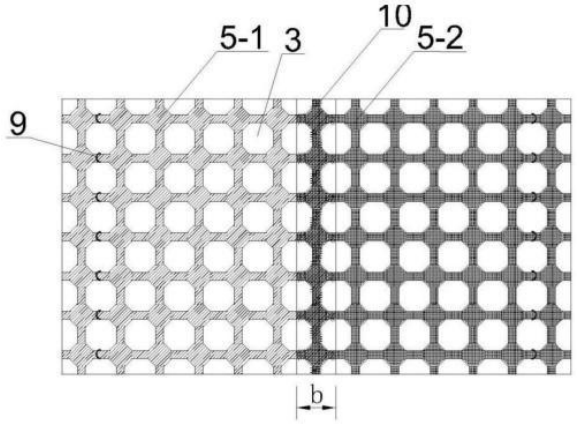

图 4 是 CFG 桩复合地基的土工格栅搭接示意图；

图中：1—嵌入式褥垫层；2—水泥土层；3—粗粒料加筋垫层；4—加筋材料；5—碎石置换层；6—软土；7—CFG 桩；8—桩端持力层；9—“U”形钉；10-高强聚丙烯带；11-上部结构层。

4 有益效果

1、嵌入式褥垫层结构的碎石置换层，对桩顶以下深度范围软土进行置换处理，提高了桩间软土的综合地基承载力，加速了软基的排水固结，减少了后期桩间土的沉降，可有效解决高强度 CFG 桩复合地基在软土地基中应用时遇到的桩间土沉降过大或桩体负摩阻力而降低复合地基承载力的问题。

2、在粗粒料加筋垫层中布置加筋材料，起到调整 CFG 桩和桩间土的承载比，进一步降低 CFG 桩应用在软土地基中或浅埋岩地基中的桩土应力，可有效解决因桩土应力比过大而造成复合地基不经济的问题。

3、嵌入式褥垫层结构的水泥土层，可提高桩顶褥垫层结构的防渗性能，优化桩顶刺入模式和应力扩散条件，可有效解决传统褥垫层应用在水利工程中的渗透问题。

4、嵌入式褥垫层结构，具有优化复合地基承载力模式、降低桩土应力比、促进软基排水固结以及提高褥垫层防渗性能的作用，既可以满足地基防渗要求，又可以发挥复合地基承载作用，对水利工程、临水工程或者地下水位较高的其他工程领域的浅埋岩软基处理具有参考价值。

参考文献

[1]郑玉晨.水利工程施工质量评价方法研究[J].建设监理,2025,(04):91-93.DOI:10.15968/j.cnki.jsjl.2025.04.022.

[2]宋国策.水利工程施工阶段造价动态控制方法研究[J].中国招标,2025,(04):158-160.

[3]李鹏飞.水利工程施工技术及现场施工管理方法研究[J].水上安全,2025,(05):7-9.