

水工黏土基固化材料力学性能试验研究

江朝华¹, 杨玉宝¹, 冷杰¹, 陶桂兰¹, 马杰²

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江南京航道工程局, 江苏 南京 210011)

摘要: 以港航工程整治过程中产生的黏性土为主要原料, 采用传统水泥、石膏和矿粉等无机结合料为固化剂, 通过半干法压制成型制备黏土基固化材料。研究表明: 黏土基固化材料的最佳配合比为黏性土 65%、水泥 18%、矿粉 12%、石膏 2.0%、石灰 3.0%, 其 28 d 抗压、劈裂抗拉和浸水强度分别为 25.6、2.5、24.1 MPa, 可替代普通混凝土制备压载块等水工材料就地应用于港航工程, 满足水工应用需要。

关键词: 黏性土; 固化材料; 力学性能; 港航工程

中图分类号: TU 528.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0033-06

Experimental study on mechanical performance of clay-based solidified material used in hydraulic engineering

JIANG Chao-hua¹, YANG Yu-bao¹, LENG Jie¹, TAO Gui-lan¹, MA Jie²

(1. College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Yangtze River Waterway Bureau of Nanjing, Nanjing 210011, China)

Abstract: Clayey soil from waterway regulation engineering is used as the main raw material to prepare clay-based solidified material. The traditional inorganic combinative material such as cement, gypsum lime and slag are used as solidified agents. The results show that the optimal mixing ratio of clay solidified material is 65% of clayey soil, 18% of cement, 2.0% of gypsum, and 3.0% of lime. The 28 d compressive, splitting tensile and the immersion strength of the solidified material are 25.6 MPa, 2.5 MPa and 24.1 MPa respectively. This solidified material can replace ordinary concrete to make ballast block used in port and waterway engineering and meet the needs of hydraulic applications.

Keywords: clayey soil; solidified material; mechanical property; port and waterway engineering

近 20 年来, 土壤固化技术得到快速发展, 国内外学者从不同的工程应用目的出发, 研制和开发了一系列土壤固化材料^[1], 其中无机结合料是一类传统的固化材料, 包括水泥、石灰和矿粉等。Zalihe 等^[2]研究表明, 与未掺入粉煤灰和石灰的情况相比, 在土壤中掺入 3% 的石灰和 15% 的粉煤灰可以明显降低固化土的吸水率及膨胀率, 并提高其强度; Shirazl^[3]认为, 石灰和粉煤灰的混合物

可以消除由于水泥土干缩而引起的开裂。贾尚华等^[5]发现在土壤中添加石灰可以提高土壤的无侧限抗压强度, 与空白样相比, 添加 2.25% 石灰, 土的无侧限抗压强度增加了 20%。目前土壤固化广泛应用于地基工程, 固化后的地基土具有良好的无侧限抗压强度、劈裂强度及抗压回弹模量等力学性能^[6]。此外, 邵仁建等^[7]曾将土壤固化材料应用于渠道防渗工程中, 取得了很好的效果。

收稿日期: 2015-07-15

作者简介: 江朝华 (1972—), 女, 博士, 副教授, 从事港工新材料新技术研究。

综上所述：水泥、石灰和石膏等无机结合料是性能稳定且效果良好的一类土壤固化剂，其适合的配合比可有效提高土壤固化材料的各种性能。目前土壤固化多用于地基处理工程中，要求的强度较低，而用于港航工程中的固化材料需要较高的强度、良好的水稳定性能以及优良的耐久性，土壤固化材料在港口、航道等水利工程中的研究与应用极少。

本文以港航工程建造过程中产生的黏性土为主要原料，首先通过掺加水泥获得满足要求的黏土基固化材料，然后分别采用矿粉和石膏等无机结合料替代水泥掺量，并以固化材料 28 d 抗压、劈裂抗拉和浸水强度为控制指标，确定黏土基固化材料的最佳配合比，研制 28 d 抗压强度和浸水强度达到 20 MPa 以上，劈裂抗拉强度达到 2.5 MPa 以上，且干缩等性能优良的黏土基固化材料，最终可以替代普通 C20 混凝土用于制备压载块等水工材料，对土壤固化材料应用于港口、航道等水利工程的应用研究进行一次有益的尝试和探索。

1 试验原材料及方法

1.1 试验原材料

黏性土取自湖北荆州，土样含水率为 25.2%，pH 值为 7.6，呈微碱性。黏性土化学组成见表 1，矿物组成见表 2。

表 1 黏性土化学组成 %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
55.37	19.13	7.47	8.03	3.92	3.28	0.81	1.07	0.14

表 2 黏性土矿物组成 %

蒙脱石	蛭石	水云母	高岭石	绿泥石	石英	闪石	长石
1.08	5.35	24.21	4.59	17.24	30.01	2.19	15.33

从表 1 和表 2 可知，黏性土中 SiO₂、Al₂O₃ 含量较高，其次依次为 CaO、Fe₂O₃、MgO、K₂O、Na₂O；黏性土中主要矿物为水云母、石英、长石及绿泥石等。

试验所用水泥为 C42.5 普通硅酸盐水泥，其化学成分和力学性能见表 3；矿粉为 S95 级矿粉；石灰为普通散装工业级石灰，其 CaO 含量为 96%；石膏采用 CaSO₄·2H₂O，分析纯试剂。黏性土压制成型试验工艺流程见图 1。

表 3 水泥化学成分、矿物组成和力学性能

化学成分及占比/%									矿物组成/%				抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O		CS	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	3 d	28 d	3 d	28 d
20.58	5.64	3.95	62.25	2.48	0.32	3.18	0.36		54.7	20.24	6.59	12.07	≥3.6	≥16.0	≥6.5	≥42.5

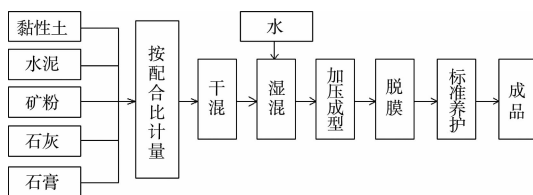


图 1 黏土基固化材料试验工艺流程

1.2 试验方法

黏性土经自然晾晒干后，采用自制碾辊碾压后过 1.18 mm 筛使用。本试验采用静力压实法制备试件，首先按配合比称量物料，将混合料在 JJ-5 水泥胶砂搅拌机中干拌 2 min 后，加适量水后湿拌 3 min。将搅拌均匀后的物料按预定的压密实度称重，加入到成型模具中，具体压制成型见图 2，其

中黏土基固化材料配合比确定研究中采用 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 试件，最佳配比试件的物理力学性能检测采用 100 mm × 100 mm × 100 mm 试件，试件采用 SHT4305 型微机控制电液伺服万能试验机加以 400 N/s 速率加压至 20 MPa 成型，成型后的试件于标准条件下养护至规定龄期后进行相关性能检测。

立方体试件的抗压、劈裂抗拉强度和表观密度检测分别依据 SL 352—2006《水工混凝土试验规程》标准进行。试件浸水强度、干缩率和吸水率检测分别依据 GB/T 4111—2013《混凝土小型空心砌块试验方法》标准进行，其中浸水强度的检测方法为将试件养护至规定龄期后浸入室温 20℃

左右的水中, 水面高出试件 20 mm, 4 d 后检测其抗压强度即为浸水强度。

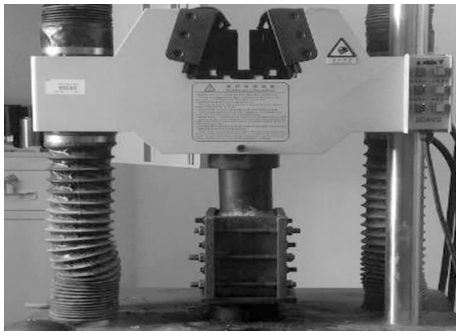


图 2 试件压制成型

2 试验结果与分析

2.1 黏土基固化材料配合比确定

2.1.1 固化剂掺量确定

水泥作为黏结剂, 不但起着主要的化学反应作用, 而且还是影响产品性能的重要指标。水泥掺量的多少将直接影响到黏土基胶凝材料的性能。本文首先通过掺加水泥获得满足要求的黏土基固化材料, 确定制备达到普通混凝土要求的黏土基固化材料所需要的最少固化剂掺量, 然后分别采用石膏、石灰和矿粉等无机结合料替代水泥, 获得无机结合料固化剂的最佳配合比。水泥掺量对黏性土压制固化材料 28 d 性能影响见表 4。

表 4 水泥掺量对黏性土压制固化材料 28 d 性能影响

黏性土/ %	水泥/ %	水(外掺)/ %	抗压强度/ MPa	劈裂抗拉 强度/MPa	浸水强度/ MPa
95	5	15.5			
85	15	15.5	8.1	1.10	5.7
75	25	15.5	14.3	1.52	11.9
70	30	15.5	18.7	1.87	16.3
65	35	15.5	24.3	2.10	19.8
60	40	15.5	26.7	2.50	20.2

从表 4 可知, 随着水泥加入量不断增加, 固化材料力学性能也随之增加, 这是由于水泥作为水硬性胶凝材料, 不仅将砂胶结成坚实的整体, 还能与水发生水化反应, 并在反应过程中逐渐生成水化硅酸钙、水化铝酸钙及水化硫铝酸钙等水化产物。随着水泥用量的增加, 固体颗粒之间的胶结性能更为牢固, 水化作用继续增强, 水化产

物不断增加, 固体颗粒之间的毛细孔不断被填实, 从而使固化材料的强度得到不断发展。水泥的掺量达到 35% 时, 黏土基固化材料 28 d 抗压强度为 24.3 MPa, 满足抗压强度的要求, 但其劈裂抗拉强度和浸水强度分别只有 2.1 MPa 和 19.8 MPa, 由于矿粉、石灰和石膏取代水泥添加, 所以一方面可以降低水泥用量、提高工业废渣利用率, 另一方面可有效改善黏土基固化材料的性能, 由此选用黏性土掺量为 65%、而固化剂总掺量为 35% 的配合比。

2.1.2 水泥和矿粉配合比的确定

固定黏性土掺量为 65%, 石灰掺量为 3%, 石膏掺量为 4%, 调整水泥和矿粉掺量研究水泥和矿粉配合比对黏性土固化材料强度影响, 试验结果如图 3 所示。

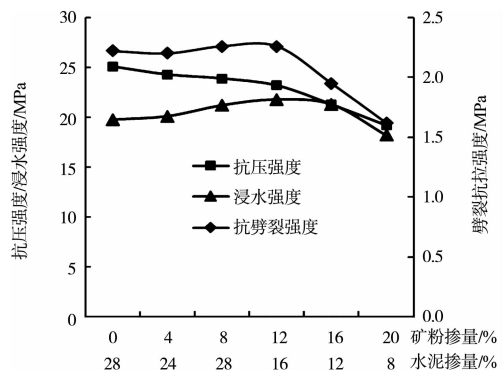


图 3 水泥和矿粉的不同配合比对黏土基固化材料 28 d 力学性能影响

从图 3 可知, 随着水泥掺量的减少和矿粉掺量的增加, 试件的抗压强度呈缓慢下降趋势, 当矿粉掺量达 16%, 超过水泥掺量时, 抗压强度呈快速下降趋势; 但矿粉的掺入对试件的劈裂抗拉强度和浸水强度有所改善, 随着矿粉掺量的增加, 试件的劈裂抗拉强度和浸水强度呈上升趋势, 当水泥掺量和矿粉掺量比为 16:12 时, 试件的劈裂抗拉强度和浸水强度达到最大。但当矿粉掺量继续增加, 则试件劈裂抗拉强度和浸水强度开始下降。因而当水泥和矿粉的最佳比例为 16%:12% 时, 该黏土基固化材料呈现较好的力学性能和水稳定性。可能的原因为矿粉使试件具有更好的黏聚性和可塑性, 此外矿粉具有良好的活性, 其组成中活性

SiO₂和Al₂O₃能与水泥浆体中的Ca(OH)₂作用生成碱度较小的二次水化硅酸钙、水化铝酸钙,这些胶凝产物的生成有利于试件强度的提高。

2.1.3 矿粉和石膏配合比确定

固定黏性土掺量为65%,水泥掺量18%,石灰掺量4%,调整不同矿粉和石膏的掺量,研究矿粉和石膏配合比对黏性土固化材料强度影响,试验结果如图4所示。

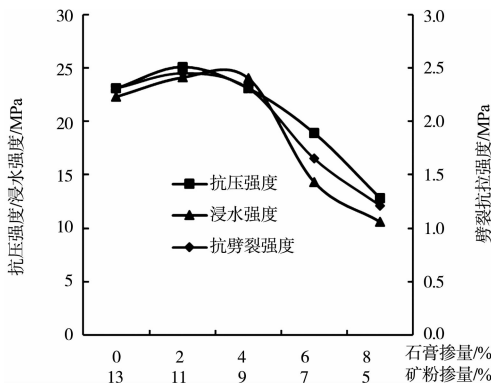


图4 矿粉和石膏的不同配合比对黏土基固化材料 28 d 力学性能影响

从图4可知,随着石膏掺量的增加,试件的抗压强度、劈裂抗拉强度和浸水强度均有一定程度的增加,当石膏掺量为2%时,与没有掺加石膏的试样相比,试件28 d抗压强度增加约8%,劈裂抗拉强度增加约6%,浸水强度增加约7%,但随着石膏继续增加,试件力学性能呈下降趋势,当石膏掺量超过4%时,试件强度快速下降。石膏掺量为8%时,试件的抗压强度、劈裂抗拉强度和浸水强度则分别下降为12.8、1.27和10.6 MPa。因为存在石膏的情况下,水化铝酸钙会和石膏发生反应生成水化硫铝酸钙(俗称钙矾石)或者是单硫型水化硫铝酸钙,钙矾石的最大特性是膨胀性,水泥水化后,黏土基固化材料中的空隙给了钙矾石的膨胀提供了很大的空间,钙矾石填充空隙使得强度增加但掺入过多的石膏,则生成大量的钙矾石等膨胀性产物,最终过大的膨胀应力导致试件开裂破坏,严重降低试件强度尤其是浸水强度。因此,适宜的石膏掺量可以有效改善黏土基固化材料力学性能,本文中矿粉和石灰的最佳

配合比为11:2。

2.1.4 石灰和石膏配合比的确定

固定黏性土掺量为65%,水泥掺量18%,矿粉掺量12%,调整不同石膏和石灰掺量,研究石灰和石膏适宜配合比对黏性土固化材料强度影响,试验结果如图5所示。

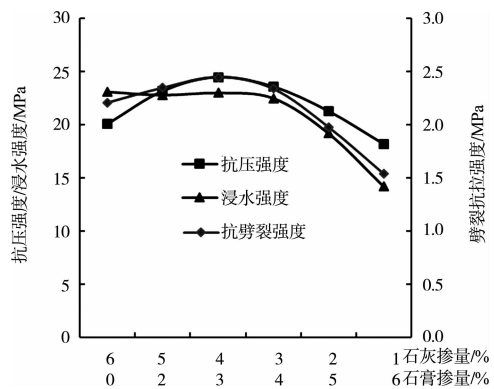


图5 石膏和石灰的不同配合比对黏土基固化材料 28 d 力学性能影响

从图5可知,随着石灰掺量的增加,黏性土28 d抗压强度、劈裂抗拉强度和浸水强度均明显增加,当石灰掺量为4%时,试件的各项力学强度达到最大值,但继续增加石灰掺量,试件的力学强度呈缓慢下降趋势。取石灰和石膏最佳配合比为4:3。由黏性土化学成分分析可知,黏性土SiO₂含量为55.37%,Al₂O₃含量为19.13%,SiO₂和Al₂O₃较易与碱性物质反应,加入石灰后,产生的Ca(OH)₂水分解离生成Ca²⁺与黏性土矿物中的钾、钠、氢离子产生交换作用,减少了土颗粒表面吸附水膜的厚度,导致土的分散性和黏塑性降低,土的微团粒结构使得其强度和稳定性提高;Ca(OH)₂与黏性土中的活性氧化硅和氧化铝之间发生反应生成水化硅酸钙凝胶和水化铝酸钙凝胶等产物,减少了颗粒间的空隙与透水性,提高了密实度,加速了火山灰反应的速度和程度^[8]。

从以上分析可知,黏土基固化材料中水泥和矿粉的最佳比例为16:12,矿粉和石膏的最佳比例为11:2,石膏和石灰的最佳比例为3:4,由此可以得到固化剂无机胶凝材料最佳配合比为52%:34%:6%:8%,即在固定黏性土掺量为65%的情况下,胶凝材料各项的最佳配合比为水泥18%、

矿粉 12%、石膏 2% 和石灰 3%。

2.2 黏土基固化材料物理力学性能

按照得到的最佳配合比制备黏性土固化材料

试样,分别测定其 7、28 和 90 d 的抗压、抗劈裂和浸水强度,以及其干缩率、表观密度和吸水率等物理性能,试验结果见表 5。

表 5 黏性土固化材料的各项性能发展规律

时间	抗压强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	浸水强度/MPa	干缩率/%	吸水率/%	表观密度/(g·cm ⁻³)
7 d	10.1	1.3	9.5	0.010	9.1	2.25
28 d	25.6	2.5	24.1	0.008	7.0	2.24
90 d	28.1	2.7	26.4	0.002	3.2	2.23

由表 5 可知,黏土基固化材料的 28 d 抗压强度、劈裂强度和浸水强度分别为 28.1、2.5 和 24.1 MPa,可以达到 C20 混凝土标准。相对于 28 d 强度,其 90 d 的抗压强度、劈裂强度和浸水强度分别提高了 2.5、0.2 和 2.3 MPa,说明该黏土基固化材料的长期稳定性好,可以用于水利工程的建设中。

吸水率和干缩率是衡量固化材料耐久性的一项重要技术指标,黏土基固化材料吸水率 28 d 为 7.0%,随着龄期的增加,其吸水率减小,90 d 吸水率为 3.2%,材料的含水率小,耐久性良好;黏土基固化材料 28 d 干缩率为 0.008%,说明材料内部干缩引起的裂缝小。黏土基固化材料 28 d 和 90 d 的体积密度分别为 2.24 g/cm³ 和 3.2 g/cm³,略小于普通混凝土的密度,随龄期的变化,表观密度变化小,质量波动小。综合以上因素可知,采用最佳配合比制得的黏土基固化材料的强度高,干缩率和吸水率小,长期水稳定性能和耐久性好,

适合用于水利工程中。

3 应用前景及经济技术分析

按照最佳配比,在厦门巨力发机械有限公司生产的 HWQT6-15 压制成型机上试制尺寸为 410 mm × 260 mm × 100 mm 的 D 型压载块。一次成型 4 块压载块,共生产了 10 × 4 块压载块,没有发现开裂现象,只是个别压载块脱模时边角出现剥落,洒水养护 28 d 后进行钻芯取样检测,换算成标准试件抗压强度值超过 30 MPa,达到了航道护岸压载块的要求。

按最佳配合比计算的黏土基固化材料成本和普通 C20 混凝土成本见表 6。考虑普通混凝土砂石材料运费及弃土运输费后,以 100 km 水路运输计,黏土基固化材料的综合单价为 202.4 元/m³,普通 C20 混凝土的综合单价为 218.5 元/m³,与普通混凝土相比,黏土基固化材料综合单价降低 8.0%。

表 6 黏土基固化材料成本分析

组成	固化材料最佳配合比/(kg·m ⁻³)	普通 C20 混凝土配合比/(kg·m ⁻³)	单价/(元·t ⁻¹)	弃土运输费/(元·km ⁻¹ ·t ⁻¹)	砂石运输费/(元·km ⁻¹ ·t ⁻¹)	固化材料综合成本/(元·m ⁻³)	普通 C20 混凝土综合成本/(元·m ⁻³)
黏性弃土	1 260		0	-18.2			
水泥(42.5)	351		385				
水泥(32.5)		326	315				
矿粉	225		250				
石膏	38		300			202.4	218.5
石灰	58		300				
石子		1 760	30		26.4		
沙子		742	35		11.1		
水	301	200	2				

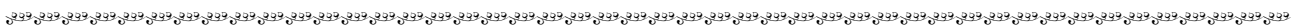
注:黏土基固化材料密度以 2 250 kg/m³ 计,运费根据苏价房 [1997] 15 号和苏建定 [1997] 第 3 号估算出水路运输约为 0.13 元/(km·t),砂石材料和弃土运距定为 100 km。

因此将港航工程黏性弃土资源通过固化技术制备成水工材料,就地应用于航道整治工程中,在避免弃土转运的同时减少土地占用,降低工程造价,解决了固体废物的二次污染问题,可有效缓解航道整治等工程对环境的影响,具有显著的社会和经济效益^[9]。

4 结论

1) 以港航工程整治过程中产生的黏性土为主要原料,以传统水泥、石膏和矿粉等无机结合材料为固化剂,通过半干法成型制备黏土基固化材料。该方法可用于处理航道整治工程中削坡等产生的弃土,压制得到的黏土基固化材料可代替普通混凝土就地应用于港航工程中制备压载块等水工材料。

2) 黏土基固化材料最佳配合比为黏性土 65%、水泥 18%、矿粉 12%、石膏 2%、石灰 3%,其 28 d 抗压强度、劈裂强度和浸水强度分别为 25.6、2.5 和 24.1 MPa,与 28 d 强度相比,90 d 抗压强度、劈裂抗拉强度和浸水强度分别提高了 2.5、0.2 和 2.3 MPa。该黏土基材料强度高,干缩率和吸水率小,长期水稳定性和耐久性好,适合用于水利工程中。



(上接第 27 页)

1) 新方法充分利用快速静态测量的快捷性和高精度特点,快速静态的基线观测精度很大程度上决定长度修正的精度,观测中要特别注意控制快速静态基线观测质量,以保证长度变形修正精度。

2) 此方法利用基线和高斯投影等角原理修正,因此理论上等价于高精度边角控制测量,具有重要的应用价值。

3) 本算法在适用范围上有一定局限性,由于作水平面近似处理,因此适用于工程区域半径 10 km 以内(或面积在 100 km²以内)的情况。

参考文献:

[1] 郭太文. 利用计算机试算投影改化的方法[J]. 甘肃科技纵横, 2011(4): 67-68.
 [2] 马文渊,李志宏,何增. 公路平面测量中的边长变形控制[J]. 山西建筑, 2007(16): 361-362.

参考文献:

[1] 谭文英,汪益敏,陈页开. 土固化材料的研究现状[J]. 中外公路, 2004, 24(4): 169-172.
 [2] Zalihe N, Emin G. Improvement of calarcous expansive soils in semi-arid environments [J]. Journal of Arid Environments, 2001, 47(4): 453-463.
 [3] Shirazl H. Field and laboratory evaluation of the use of lime fly ash to replace soil cement as a base course[J]. Transportation Research Record, 1999, 1652: 270-275.
 [4] 宋文忠. 无机固化粉煤灰应用技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2004, 32(9): 64-67.
 [5] 贾尚华. 石灰水泥复合土固化机理及力学性能的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
 [6] 杨宏宇. 土壤固化剂在公路基层底基层中的应用[D]. 西安: 长安大学, 2013.
 [7] 邵仁建,章伟平. 土壤固化剂在渠道防渗工程中的应用[J]. 江西水利科技, 2002(2): 81-85.
 [8] 项建国,陈树东,余伟,等. 淤泥-石灰-粉煤灰免烧砖制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2014(10): 2 706-2 709.
 [9] 况宏伟,余珍,雷国平,等. HAS 土壤固化剂在长江航道削坡土上的固化试验[J]. 水运工程, 2014(12): 205-210.

(本文编辑 郭雪珍)

[3] 汪建鸽,杨建华. 公路测量中边长改化及 Gauss 投影坐标换算[J]. 中南公路工程, 2000(4): 1-2.
 [4] 周志鸿. 浅谈测距边长改化在地铁 R2 线(机场段)精密导线测量中的运用[J]. 城市道桥与防洪, 2009(8): 127-130.
 [5] 王文贯. 浅谈测距边长改化在勐曼二级水电站施工控制网测量中的应用[J]. 人民珠江, 2012(4): 15-17.
 [6] 陈于,胡友健,陈刚. 荆江河道 GPS 与全站仪边长及方向改化[J]. 地理空间信息, 2010(2): 49-51.
 [7] 施品浩. GPS 定位作业模式的探讨[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1992(6): 18-28.
 [8] 赵旭,邱斌,贺跃光. GPS 测量在吉罗公路改建工程中的应用[J]. 勘察科学技术, 2001(2): 53-55.
 [9] GB/T 18314—2001 全国定位系统(GPS)测量规范[S].
 [10] JTS 131—2012 水运工程测量规范[S].
 [11] GB 50026—2007 工程测量规范[S].

(本文编辑 武亚庆)