

引江济淮试验工程河道边坡锚杆检测对比试验

陈圣刚¹, 于威^{2,3}, 李国维^{2,4}, 吴少甫⁵

- (1. 安徽省投资集团控股有限公司, 安徽 合肥 230000;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学道路与铁道工程研究所, 江苏 南京 210098;
4. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 5. 中铁二十局集团有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要:依据 GB 50086—2015《岩土锚杆与喷射混凝土支护技术规范》和 SL 377—2007《水利水电工程锚喷支护技术规范》对引江济淮试验工程膨胀土边坡、软岩边坡加固锚杆进行拉拔检测试验。结果表明,锚杆端部位移和检测方法相关,GB 法检测的杆体端部位移大于 SL 法,位移转换系数为 0.9~0.95;软岩边坡中锚杆的端部位移量小于弱膨胀土边坡;两种方法用于软岩及弱膨胀土边坡加固锚杆质量检测时,会产生弹性伸长值过大现象,采用杆端位移时间过程评价锚杆质量更具有合理性;SL 法、GB 法检测到的锚杆轴力线性相关,转换系数为 0.9~1.05;采用 SL 法检测非预应力锚杆具有可行性,通过换算可得到 GB 法检测数据。

关键词:膨胀土;软岩;锚杆;检测方法;数据拟合;引江济淮工程

中图分类号:TV522 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2017)06-0069-07

A comparative study on different testing methods for canal slope reinforcement bars in the water diversion experimental project from Yangtze to Huaihe River//CHEN Shenggang¹, YU Wei^{2,3}, LI Guowei^{2,4}, WU Shaofu⁵
(1. Anhui Investment Group Holding Co., Ltd., Hefei 230000, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Highway and Railway Research Institute, Hohai University, Nanjing, 210098, China; 4. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Pull out test of the anchors in the water diversion experimental project from Yangtze to Huaihe River in both expansive soil slopes and soft rock slopes was carried out on the basis of *Technical Code for Engineering of Ground Anchorages and Shotcrete Support* (GB 50086-2015) and *Technical Specification of Shotcrete and Rock Bolt for Water Resource and Hydropower Project* (SL 377-2007). The results show that the displacement of the rod measured by the GB method is larger than that of the SL method, with a displacement conversion coefficient of 0.9~0.95. The displacement of the rod in soft rock slopes is less than that in weak expansive soil slopes. During the anchor rod tests in soft rocks and weak expansive soils, both GB and SL method overestimate the elastic extension values and it is more reasonable to evaluate the rod quality through the time process of the displacement. There is a linear relationship between the axial force measured by the two methods and the conversion coefficient is around 0.9~1.05. The SL method is a more efficient approach for non-prestressed anchors and the test data obtained by both methods can be converted mutually, which has positive significance and economic value for the evaluation of engineering quality and construction progress.

Key words: expansive soil; soft rock; anchor rod; inspection method; data fitting; water diversion project from Yangtze to Huaihe River

引江济淮为跨流域调水工程,全长 1 048 km,兼具航运和环保功能,河道水下边坡长期承受动水荷载作用,要求边坡及衬砌混凝土面板需保持长期稳定,加固方案之一为采用非预应力锚杆格构梁,锚杆

施工质量检测方法为灌浆 28 d 后实施拉拔试验,根据抗拔力和杆体位移情况判定施工质量和对设计要求的符合情况。

锚杆被广泛用于土木工程的临时或永久性加固

结构中^[1-2],我国 1964 年首次在梅山水库坝基加固中采用预应力锚杆^[3]。锚杆所能承担的拉拔荷载是锚固工程的控制指标,现场拉拔检测是锚杆应用的必要环节。对比试验显示^[4],CECS 22—2005《岩土锚杆技术规程》、GB 50086—2001《锚杆喷射混凝土支护技术规范》、GB 50330—2002《建筑边坡工程技术规范》、GB 50007—2002《建筑地基基础设计规范》等相关规范,在锚杆拉拔检测方面的试验方法、数据处理的标准并非一致,均有各自的针对性。工程实践^[5]表明,相关规范对锚杆检测方法的规定,具有较大的余地,使得锚杆质量评价结果产生较大的差异。现有锚杆锚固质量检测方法加荷时间长、加载等级多,导致锚杆检测试验周期长,制约主体工程进度^[6]。

本文通过现场对比试验,比较 GB 50086—2015《岩土锚杆与喷射混凝土支护技术规范》和 SL 377—2007《水利水电工程锚喷支护技术规范》(以下分别简称 GB 法与 SL 法)的差异,建立两种规范方法检测指标之间的关系,提出适用于本工程的锚杆质量检测方法。

GB 法针对预应力锚杆,检测时需要循环加、卸载荷载计量对应位移,优点是可以通过检测到的杆体位移数据计算得到塑性位移量,据此评估杆体与围岩的黏结状态,缺点是要求较长的现场工作时间,检测效率较低;SL 法针对非预应力锚杆,检测时只需要分级加荷计量对应位移,无卸荷过程,优点是具有较高的检测效率,缺点是不能评价杆体在试验荷载条件下的黏结状态(原因在于无法确定荷载的分布情况,不能计算杆体在试验荷载下的弹性变形)。

现场质量检测工作的性质要求检测方法具有高效率特征,获得更多的质量信息更是检测工作的根本目的。为实现两种需要的统一,引江济淮试验工程河道边坡加固锚杆质量施工检测时进行了检测方

法对比试验,目的在于开发 SL 法锚杆检测数据的潜在价值,发挥其高效率优势,并利用 GB 法检测数据可解读性强的特点。

1 试验方案及过程

1.1 工程地质条件

引江济淮试验工程位于安徽省合肥市蜀山区小庙镇,里程桩号 K40+700 ~ K42+200,全长 1.5 km。上覆地层主要为全新统粉质壤土、上更新统粉质壤土、粉质黏土、砂性土,具有弱、中膨胀性,力学参数见表 1。下伏基岩为全风化或强风化白垩纪粉砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩,抗压强度低,具有强崩解性,遇水易软化,岩性呈现暗红色、紫红色,呈柱状、短柱状,中厚层状构造,干燥时易龟裂,节长 5 ~ 50 cm, RQD(rock quality designation)为 10% ~ 50%,局部夹薄层或极薄层,结构面发育,填充黑色铁锰膜,岩体基本质量为Ⅳ级,分级为软岩,产状倾向 330°NW ~ 15°NE,倾角 15° ~ 35°,力学参数见表 2,地层剖面见图 1。

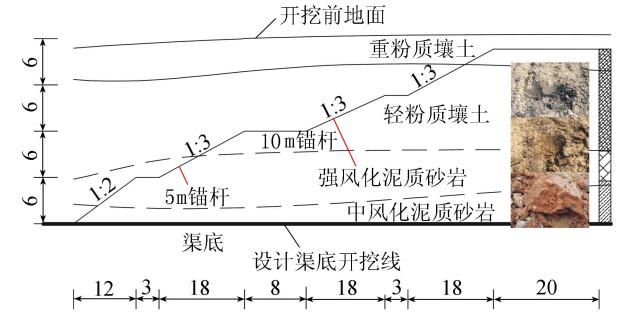


图 1 试验锚杆地层剖面图(单位:m)

1.2 试验试件制作

1.2.1 锚杆

试验采用的筋材为 $\varnothing 25$ 的 HRB400 螺纹钢筋和 $\varnothing 28$ 的 GFRP,其材料组分及基本力学参数见表 3。试验共计 12 根锚杆试件,试验锚杆布置见表 4。

表 1 轻粉质壤土常规力学参数

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度	含水率/%	孔隙比	饱和度/%	液限/%	塑限/%	压缩模量/MPa	抗剪强度(总应力)	
								c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
2.02	2.72	22.3	0.636	91.2	34.6	21.3	8.45	38.4	17.9

表 2 泥质砂岩常规力学参数

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	相对密度	含水率/%	弹性模量/MPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗剪强度(总应力)	
						c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
2.23	2.58	18	1.6	0.31	1.5	45	31

表 3 GFRP 和钢筋锚杆常规力学参数及材料组分

锚杆种类	玻璃纤维占比/%	树脂占比/%	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	伸长率/%
钢筋锚杆	77	23	561	42	1.6
GFRP 锚杆			400	200	2.5

表 4 试验锚杆布置

锚杆种类	桩号范围	地质条件	长度/m	数量
钢筋锚杆	K42+055 ~ K42+075	泥质砂岩	5.0	3
	K42+047 ~ K42+067	膨胀土	10.0	3
GFRP 锚杆	K42+055 ~ K42+075	泥质砂岩	5.0	3
	K42+047 ~ K42+067	膨胀土	10.0	3

1.2.2 传感器

在杆体表面沿轴线开槽,尺寸为 2 mm×2 mm,用酒精清洗槽口并风干,将光栅光纤传感器放置槽内,在锚杆两端将传感器固定,用环氧树脂胶覆平凹槽,见图 2。以锚杆与坡面的交界点为坐标原点,向内为坐标正向,向外为负向,光纤光栅传感器布置见图 3。

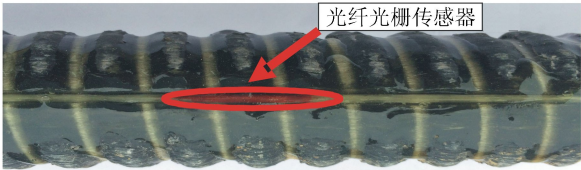


图 2 内置光纤光栅传感器

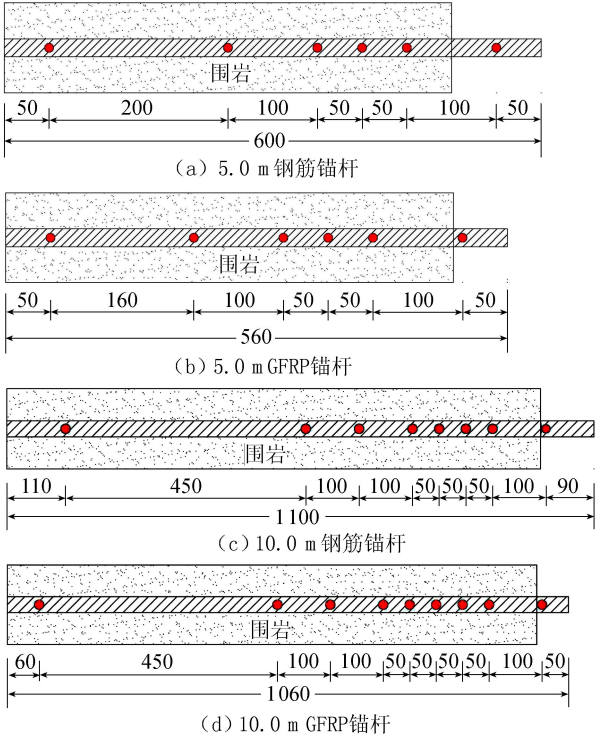


图 3 光纤光栅传感器布设位置(单位:cm)

1.2.3 试验装置

试验锚杆端部锚固采用套筒灌浆法^[7]。将定位环通过螺纹拧入钢套管,然后将锚杆伸入钢套管,放入定位环中孔固定定位,将无声破碎剂与水按照水灰比 1 : 3.3^[8]的比例混合搅拌均匀后倒入钢套管中,用丝杆赶走其中的气泡。钢套管和锚杆约束黏结材料的膨胀从而产生膨胀力,在千斤顶对拉杆施加拉力时,由于膨胀力的作用使钢套管和锚杆同

步受力。

试验装置包括钢支架、钢垫板、测力计、位移计、空心油压千斤顶、张拉螺母等。测力计采用三弦式荷载传感器并且用振弦式频率读数仪采集数据,采用 MOI 的 SM125 解调仪采集光纤光栅传感器数据。拉拔装置结构见图 4。

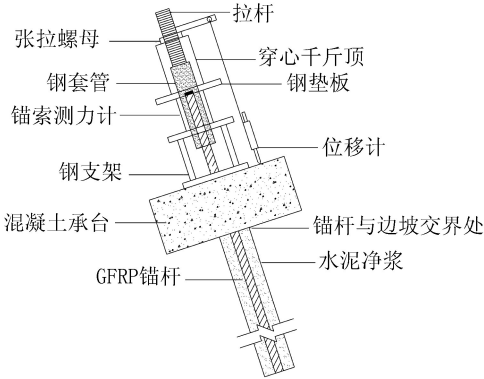


图 4 拉拔试验装置

加载时,穿心千斤顶作用在张拉螺母上张拉拉杆,钢套管与拉杆之间通过螺纹连接,将拉力从拉杆传递到钢套管,继而传递给锚杆^[9-10]。

1.3 加载及测量方式

SL 法最大检测荷载是 1.2N_d(N_d 为杆体拉力设计值),试验过程中均匀、缓慢、逐级施加拉拔力,加荷速率不大于 1 kN/s,同时记录锚杆拉力、位移和试验现象,加载方式见表 5。

表 5 SL 法检测试验过程(加载方式)

5.0 m 锚杆 荷载/kN	10.0 m 锚杆 荷载/kN	稳压时间/ min
8	12	1
32	48	1
56	84	1
80	120	1
96	144	5

GB 法最大检测荷载也是 1.2N_d,荷载分为 5 个等级,每一级荷载的稳压时间是 1 min,最大荷载稳压时间是 5 min,加载方式见表 6。

表 6 GB 法检测试验过程

试验过程	5.0 m 锚杆 荷载/kN	10.0 m 锚杆 荷载/kN	稳压时间/ min
加载	8	12	1
	32	48	1
	56	84	1
	80	120	1
	96	144	5
卸载	80	120	1
	56	84	1
	32	48	1
	8	12	1

锚杆张拉前,取 10 ~ 20 kN 对锚杆预张拉 1 次或 2 次,使锚杆系统完全平直,各部位接触紧密,以

减缓张拉过程中各部分的受力不均匀。

2 试验结果与分析

2.1 锚杆杆体端部位移总量

图5为软岩边坡5.0 m长加固锚杆检测时的杆体端部位移,可以看出,对于GFRP锚杆,两种规范方法检测引起的端部位移几乎相同,说明先期SL法的无循环拉拔过程对后期GB法的有循环拉拔过程没有构成显著影响;对于钢筋锚杆,GB法方法检测的位移大于SL法检测的位移,说明先期SL法的无循环拉拔过程对后期有循环拉拔过程构成一定影响。

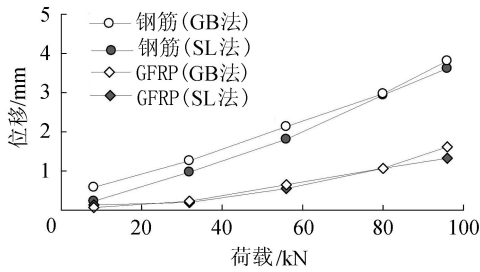
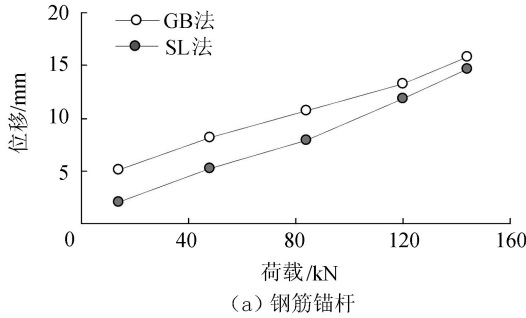
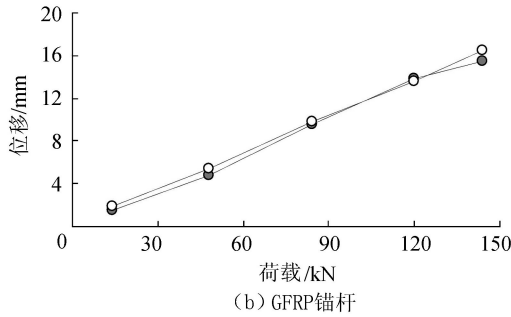


图5 软岩边坡5.0 m长加固锚杆端部位移

图6为弱膨胀土边坡10.0 m长加固锚杆检测时的杆体端部位移,图中显示,GFRP锚杆的端部位移对于先期拉拔的反应不明显,而钢筋锚杆则有明显的反应,即先期拉拔对后期拉拔时的杆体端部位移构成显著影响。



(a) 钢筋锚杆



(b) GFRP锚杆

图6 弱膨胀土边坡10.0 m长加固锚杆端部位移

由此,对于弱膨胀土边坡采用钢筋锚杆加固的工况,先期无循环拉拔过程对后期有循环拉拔过程有显著的影响,比软岩边坡的情况更显著。

2.2 锚杆体端部位移组成

图7为软岩土边坡加固加固锚杆的拉拔检测结

果,图8为弱膨胀土边坡加固加固锚杆的拉拔检测结果。

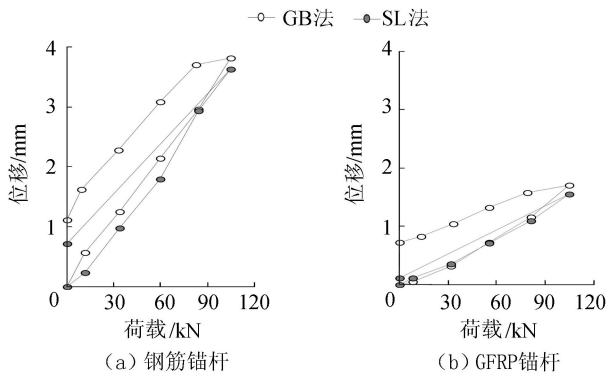


图7 软岩边坡5.0 m长锚杆端部位移

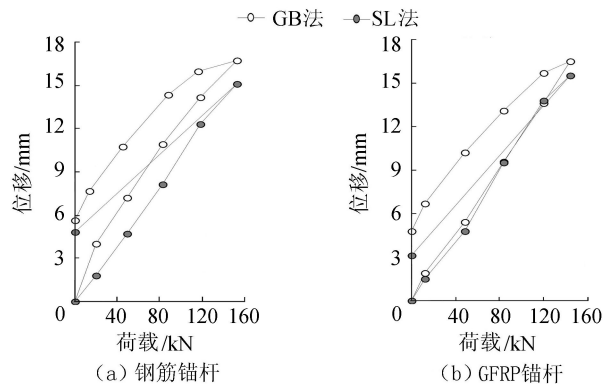


图8 弱膨胀土边坡10.0 m长锚杆端部位移

图7(a)(b)的坐标幅值相同,比较发现,软岩边坡中锚杆在经历拉拔试验时,同级荷载下GB法的杆端位移量大于SL法,卸荷到零后残留的塑性位移量也大,两种材料的锚杆表现出相同的特征;比较两种检测方法在两种材料的锚杆上残留的塑性位移,GB法检测后GFRP锚杆表现出来的塑性位移总量小于钢筋锚杆,但两种检测方法产生的塑性位移差值大于钢筋锚杆,如表7所示。

图8显示,弱膨胀土边坡中加固锚杆拉拔试验时的变形特征与软岩边坡中的锚杆具有相同的规律。

上述现象的原因在于,对比试验实施在同一根锚杆上,先实施的SL法检测对锚杆的黏结状态构成了一定的损伤,导致GB法实施时相同荷载下产生相对较大的弹、塑性位移;GFRP锚杆的弹性模量仅为钢筋锚杆的1/4,与加固体之间具有更好的变形协调性,界面黏结状态受到较小的损伤,锚杆体上的荷载传递深度更小,SL法张拉时无循环,对GFRP锚杆产生的损伤影响深度相对更小。由此导致GB法检测时钢筋锚杆的弹塑性位移大于GFRP锚杆,而两种方法检测到的杆体塑性位移差别小于GFRP锚杆的塑性位移。

表7中,理论弹性伸长量是根据GB法中的规

表 7 锚杆体端部位移

加固地层 岩性	锚杆材料	锚杆长度/ m	锚杆直径/ mm	拉拔荷载/ kN	塑性位移/mm		弹性位移/mm		自由杆体+ 1/3 锚固长/m	理论弹性 伸长量/mm
					GB 法	SL 法	GB 法	SL 法		
软岩	GFRP	5.0	28	96	0.74	0.11	0.88	1.21	2	7.80
	钢筋	5.0	25		1.11	0.72	2.71	2.91	2	1.96
弱膨胀土	GFRP	10.0	28	144	4.81	3.12	11.29	12.38	4	23.40
	钢筋	10.0	25		5.62	4.84	11.09	9.76	4	5.87

定算出的,数据显示,检测到钢筋锚杆的弹性伸长量大于理论值,软岩和弱膨胀土边坡中均显示相同的特征。上述现象说明:锚杆理论伸长值计算时采用的杆长基数,即自由段+1/3 锚固长,不一定合理,实际可能更大;检测时杆体端部位移测量方法的精度不够,杆体端部加载装置的自身变形和整体位移未被完全剔除。

由此,对于软岩、弱膨胀土等低强度被加固体,现有 GB 法、SL 法用于加固锚杆质量检测时,试验方法和数据处理方法应做适当调整,需要合理确定弹性伸长量计算基数,合理测量端部加载装置的自身变形和整体位移。

2.3 锚杆体端部位移时间过程

图 9 为软岩边坡加固锚杆在检测的最大荷载条件下,杆体端部位移与稳压时间的关系,图 10 为弱膨胀土边坡加固锚杆在检测的最大荷载条件下,杆体端部位移与稳压时间的关系。

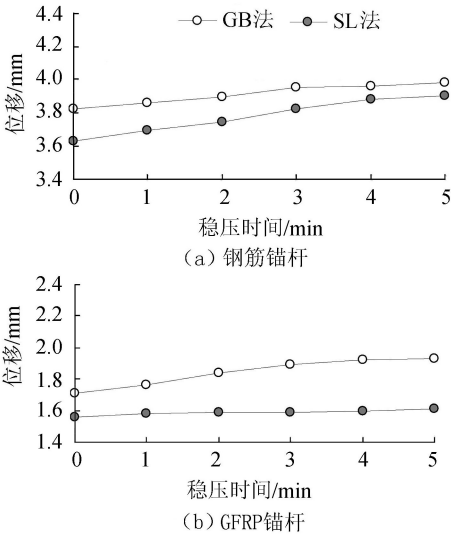


图 9 软岩边坡 5.0 m 长锚杆端部位移和的时间关系

图 9 显示,GB 法、SL 法检测的锚杆端部位移时间过程具有较高的相似性,软岩边坡加固锚杆杆体端部位移在规定的稳压时间 5 min 内均趋于一个稳定值,位移增量小于 1 mm,符合规范要求,SL 法先期张拉对后期 GB 法张拉未产生显著影响。

图 10 显示,弱膨胀土边坡加固锚杆杆体端部位移与软岩边坡加固杆体端部位移具有相同的规律。

可见,从杆体端部位移时间过程考察,检测锚杆

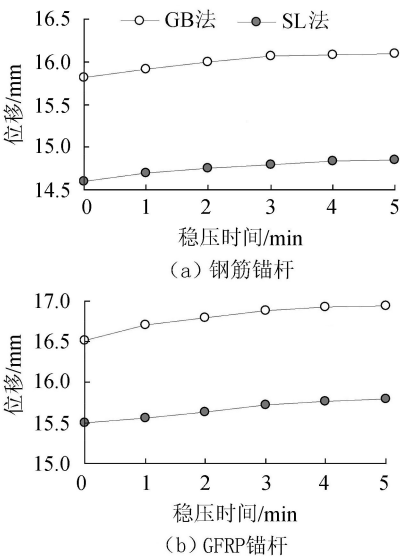


图 10 弱膨胀土边坡 10 m 锚杆端部位移和时间的关系

的性状处于规范允许范围内,说明锚杆杆体在受到荷载张拉引起的胶结损伤后,锚杆与胶结体之间应力重新调整,又达到了新的平衡,可以承担设计荷载。同时也说明,即使检测锚杆的弹性伸长量大于理论值,锚杆也可能是有效的。

综上,对于 GFRP 锚杆,无论是软岩或弱膨胀土边坡,先期 SL 法无循环拉拔过程对后继 GB 法有循环拉拔过程不构成显著影响;对于钢筋锚杆,先期 SL 法无循环拉拔过程对后继 GB 法有循环拉拔过程构成一定影响,两种方法测定的位移转换时,GB 法检测的杆端位移要给予小于 1 的系数修正,本试验的修正系数为 0.90 ~ 0.95;GFRP 锚杆的塑性位移小于钢筋锚杆,软岩边坡中锚杆的位移量小于弱膨胀土边坡;现行 SL 法、GB 法用于锚杆质量检测时,其试验方法和数据处理方法均需要调整;对于软岩、弱膨胀土等强度较低的被加固体,采用杆端位移时间过程评价锚杆质量更具有合理性。

2.4 不同检测方法的锚杆轴力

图 11 为软岩边坡 5.0 m 锚杆采用两种方法检测所得到的轴力关系,图 12 为弱膨胀土边坡 10.0 m 锚杆采用两种方法检测所得到的轴力关系。

以上各图显示,GB 与 SL 法检测到的锚杆轴力在各不同深度处均近似为线性关系,采用式(1)进行线性拟合,得到的参数见表 8。

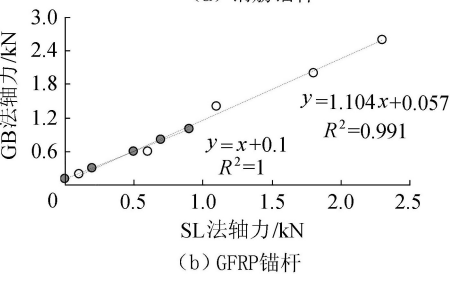
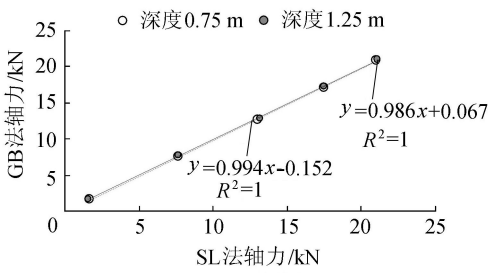


图 11 软岩边坡 5.0 m 锚杆体轴力

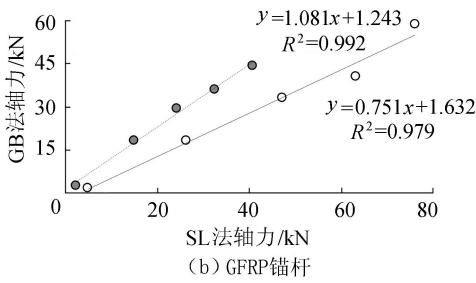
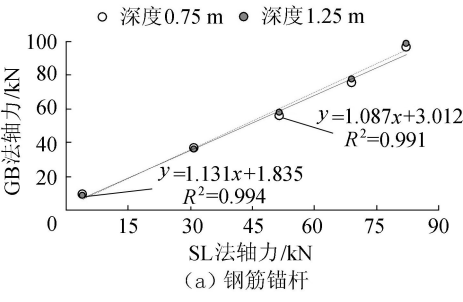


图 12 弱膨胀土边坡 10.0 m 锚杆体轴力

$$N_{GB} = aN_{SL} + b \quad (1)$$

式中: N_{GB} 为采用 GB 法所测轴力; N_{SL} 为采用 SL 法所测轴力; a, b 为拟合参数。

表 9 显示, GB 法与 SL 法检测的锚杆轴力之间具有良好的线性关系, 相关性指标大于 0.93, 说明两种检测方法得到的锚杆轴力变化规律近乎相同, 依据 SL 法检测到的锚杆轴力, 按照相关关系换算得到的 GB 法检测轴力值, 完全可以反映实际锚固状态。

图 13 为相关参数 a, b 与锚杆深度的关系, 可以看出, 相关性参数与锚固深度具有近似线性关系, 采用线性拟合, 联合式(1)得到 GB 法与 SL 法检测的锚杆轴力间关系经验模型如式(2)所示, 其中包含锚杆深度的影响, 模型参数见表 9。

$$N_{GB} = (ch + d)N_{SL} + eh + f \quad (2)$$

其中 $ch + d = a$ $eh + f = b$
 式中: h 为深度; c, d, e, f 为拟合参数。

表 8 GB 法与 SL 法锚杆轴力检测值的相关性参数

加固地 层岩性	锚杆类型	深度/ m	参数		相关性 R^2
			a	b	
软岩	5.0 m 钢筋 锚杆	0.75	0.994	-0.152	1
		1.25	0.986	0.067	1
		1.75	0.963	-0.054	0.999
		2.75	0.964	0.065	0.935
	5.0 m GFRP 锚杆	0.75	1.104	0.057	0.991
		1.25	1	0.100	1
		1.75	1.190	0	1
		2.75	0.790	0.040	0.987
弱膨胀土	10.0 m 钢筋 锚杆	0.75	1.049	4.118	0.982
		1.25	1.105	2.939	0.993
		1.75	1.087	3.012	0.991
		2.25	1.131	1.835	0.994
	10.0 m GFRP 锚杆	3.25	1.128	2.092	0.995
		4.25	1.334	2.265	0.991
		0.75	1.033	3.245	0.993
		1.25	1.068	2.427	0.992
		1.75	0.751	1.632	0.979
		2.25	1.081	1.243	0.992
		3.25	1.129	0.044	0.985

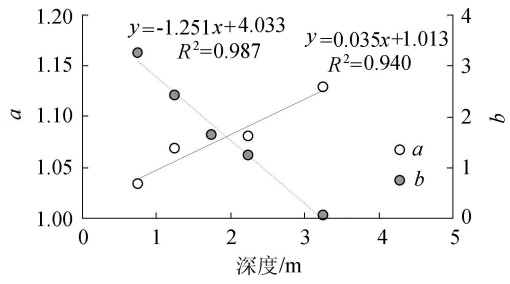


图 13 弱膨胀土边坡 10 m GFRP 锚杆
参数 a, b 与深度关系

表 9 GB 法与 SL 法检测的锚杆轴力间的相关性参数

加固 对象	锚杆 类别	a - h 关系			b - h 关系		
		c	d	R^2	e	f	R^2
泥质 砂岩	5.0 m 钢筋	-0.031	1.02	0.928	0.109	-0.237	0.997
	5.0 m GFRP	-0.154	1.208	0.992	0.524	-0.43	0.959
弱膨 胀土	10.0 m 钢筋	0.081	0.975	0.943	-0.47	3.943	0.738
	10.0 m GFRP	0.035	1.103	0.940	-1.251	4.033	0.987

图 14 为弱膨胀土边坡 10.0 m GFRP 锚杆不同深度杆体轴力实测值与经验模型计算值之间的对比, 可见经验模型具有较好的精度。

综上, 所建经验模型实质上反映了先期张拉对黏结状态的影响, 而实际情况应该是只有一种试验数据, 其中不包含损伤的影响, 采用本转换模型得到的 GB 法轴力应该比实际的要小, 即是安全的。转

换模型和场地条件对应,只能用于同一个场地。检测之前先进行标准试验,建立适应本场地的转换模型,然后用于本场地的其他锚杆。

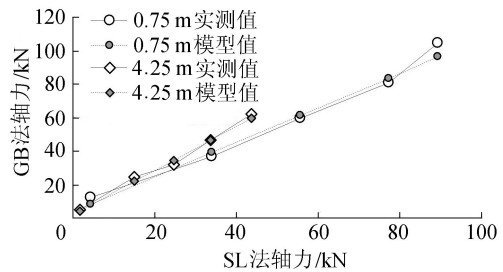


图 14 弱膨胀土边坡 10.0 m 钢筋锚杆轴力曲线

3 结 论

a. 锚杆端部位移和检测方法相关。GFRP 锚杆的端部位移差别不大,钢筋锚杆的端部位移差别明显,先期加载引起的端部位移小于后期加载引起的端部位移。针对 SL 法的钢筋锚杆端部位移转换成 GB 法的杆体端部位移的修正系数为 0.90 ~ 0.95。软岩边坡中锚杆的端部位移量小于弱膨胀土边坡。

b. 软岩边坡加固锚杆承载具有特殊性。现行 SL 法与 GB 法用于软岩及弱膨胀土边坡加固锚杆质量检测时,会产生不合理现象,其试验方法和数据处理方法均需要调整。采用杆端位移时间过程评价锚杆质量更具有合理性。

c. SL 法与 GB 法检测到的锚杆轴力具有相关性。同一根锚杆采用不同规范方法检测,所测杆体轴力间存在线性关系,由 SL 法检测的轴力计算 GB 法检测的轴力时,修正系数为 0.90 ~ 1.05,修正系数大小和地质条件、锚杆类型有关。

d. 采用 SL 法检测非预应力锚杆具有可行性。采用 SL 法现场检测的锚杆,可通过本文建立的模型转换为 GB 法检测数据,这对于工程质量评定和施工进度具有积极意义和经济价值。

参考文献:

[1] ASHRAF G, ADEL H, MIKHAIL H. Uplift behavior of screw anchors in sand. II: hydrostatic and flow conditions [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 117 (5): 794-808.

[2] BENMOKRANE B, CHEKIRE M, XU H, et al. Behavior of grouted anchors subjected to repeated loadings in field [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 121 (5): 413-420.

[3] 程良奎. 岩土预应力锚固技术的应用和发展趋向[J]. 工业建筑, 1992 (9): 37-42. (CHENG Liangkui. Application and development tendency of prestressed anchors in rock and soil[J]. Industrial Construction, 1992

(9): 37-42. (in Chinese))

[4] 杨立, 官见荣, 华洪勋. 支护锚杆检测在各规范中相关规定的比较[J]. 工程质量, 2015, 33 (3): 13-20. (YANG Li, GUAN Jianrong, HUA Hongxun. Comparison of the provisions of supporting bolt detection in relevant codes [J]. Construction Quality, 2015, 33 (3): 13-20. (in Chinese))

[5] 徐华斌, 胡佳兴, 伊克良. 全长黏结型岩石锚杆抗拔力检测问题的探讨[J]. 工程设计与研究, 2004 (1): 33-37. (XU Huabing, HU Jiaying, YI Kelian. Discussion on detection of uplift resistance of full-length bonded rock anchor rod [J]. Engineering Design & Research, 2004 (1): 33-37. (in Chinese))

[6] 柯玉军. 锚杆检测技术研究及应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.

[7] 李国维, 倪春, 葛万明, 等. 大直径喷砂 FRP 筋应力松弛试件锚固方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (2): 227-234. (LI Guowei, NI Chun, GE Wanming, et al. Anchoring method for stress relaxation specimens with large-diameter sand-surface FRP bars [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35 (2): 227-234. (in Chinese))

[8] 栾瑞宣, 傅菊根, 鲁力. 静态破碎剂破碎机理研究[J]. 四川建材, 2012 (6): 189-190. (LUAN Ruixuan, FU Jugen, LU Li. Study on crushing mechanism of static broken [J]. Sichuan Building Materials, 2012 (6): 189-190. (in Chinese))

[9] 李国维, 刘学, 贺冠军. 钢筋及 GFRP 筋锚杆与框架梁连接方式研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (11): 1990-1998. (LI Guowei, LIU Xue, HE Guanjuan. Research of anchor frame beam's connection mechanism with GFRP bar and steel bar [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (11): 1990-1998. (in Chinese))

[10] 李国维, 郑诚, 陈圣刚, 等. 引江济淮软岩全黏结 GFRP 筋锚固蜕化现场实验[J]. 水利学报, 2017, 48 (7): 1-11. (LI Guowei, ZHENG Cheng, CHEN Shenggang, et al. Bond degeneration of fully grouted GFRP bar in submerged soft rock in diversion of water from Changjiang River to Huaihe River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (7): 1-11. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-04-20 编辑: 郑孝宇)

