

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.06.014

坝陵河大桥隧道锚围岩力学特性原位试验研究

赵海斌^{1 2}, 于新华², 彭运动³, 蒋中明^{2 4}

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,湖南 长沙 410014;
3.中交公路规划设计院有限公司,北京 100055;4.长沙理工大学岩土工程研究所,湖南 长沙 410076)

摘要:为全面认识坝陵河悬索桥西岸隧道锚的受力变形特性及安全稳定性,在分析研究锚碇区地层岩性特点基础上,利用相似性原理设计了与锚碇系统实际受力状态相适应的隧道锚原位模型试验系统,研究了原位试验加载及测试方法.试验成果表明,锚塞体混凝土和岩体在不同岩体条件下呈现出不同的变形特点:当岩体质量较好时,变形基本呈线性变化;当锚塞体周围岩体质量较差时,岩体的非线性变形特征明显.锚塞体与岩体之间的剪切残余变形表明锚塞体和岩体接触面在设计荷载作用下将产生较大的相对滑动.完整性较差岩体中的锚塞体变形远大于完整性较好情况下的锚塞体变形.

关键词:隧道锚;锚塞体;原位模型试验;残余变形;相对位移;坝陵河大桥

中图分类号:U443.24 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2009)06-0680-05

隧道锚是我国西部开发建设中大跨径悬索桥锚碇的重要形式之一.隧道锚把围岩作为锚碇的一部分,共同承受缆索的拉力,具有突出的造价优势.如美国的华盛顿桥Ⅲ,其新泽西岸隧道锚与纽约岸重力锚混凝土用量比为 1:4.8,我国的四渡河桥,隧道锚与重力锚土石方开挖量之比为 1:5^[1].近年来,隧道锚在我国很多桥梁工程中得到了应用,并开展了相应的科研试验工作.董志宏等^[2]对矮寨悬索桥隧道锚碇稳定性进行了数值分析;曾钱帮等^[3]通过数值分析方法对坝陵河悬索桥隧道锚方案进行了优化研究;朱玉等^[4]用三维弹塑性有限元法对四渡河桥隧道锚系统全部工序进行了模拟,通过数值超载分析了解锚碇结构性能.此外,肖本职等^[5-11]通过对物理模型试验及数值计算成果的分析,研究了隧道锚的稳定性、变形特点和承载力.

在建中的坝陵河大桥,主跨为 1088 m,是目前国内最大跨径的钢桁梁悬索桥.桥梁东锚碇采用重力锚,西锚碇采用隧道锚,双索荷载高达 600 MN,主缆上巨大的拉力由锚碇与围岩共同承担.为保证桥梁安全运行,必须对隧道锚结构与岩体的受力状态和稳定性加以研究.在设计阶段,按照西锚碇隧道锚方案,进行现场缩尺模型试验,了解锚塞体与围岩的工作性态,以期通过相似性与相关分析对原型做出预测,从而为工程设计分析提供依据^[12].

1 工程概况

坝陵河悬索桥西锚碇区位于坝陵河西岸斜坡中上部,地势相对较陡,地形坡度在 30°~50°之间.地层岩性为三叠系中统竹杆坡组一段(T_{2zl})的灰岩和杨柳井组(T_{2y})的白云岩及白云质灰岩,两套岩层均为硬质岩.岩层倾向与坡向接近,为顺向坡.岩层倾角 75°~90°,局部出现波状起伏.岩体完整性浅部较差,深部较好.浅部泥晶灰岩和白云岩及白云质灰岩均以弱风化为主,由于岩层陡倾,受重力作用,浅部层面多呈张性,岩溶沿层面发育,层间普遍夹 5~20 cm 红黏土及少量岩石残块.表 1 给出了锚碇区岩体物理力学参数.

西锚碇由 2 个隧道锚组成.隧道轴线长度为 74.34 m,其中前锚室轴线长度 31.34 m,锚塞体轴线长度 40 m,后锚室轴线长度 3 m.垂直最大深度约 95 m,后端部总宽 49 m.隧道口单洞断面尺寸为 10 m×10.8 m,顶拱半径 5 m,洞底单洞断面尺寸为 21 m×25 m,顶拱半径 10.5 m.左右隧道最小净距 7 m.

收稿日期:2008-10-16
作者简介:赵海斌(1965—),男,湖南衡山人,教授级高级工程师,主要从事岩土工程设计研究.

表 1 围岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

岩 性	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	抗剪(断)强度		变形模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa
		$\varphi/(\text{^\circ})$	c/MPa			
弱风化泥晶灰岩	2.60	33.0	0.47	2.00~5.00	0.35	0.2
弱风化白云岩	2.63	35.0	0.48	3.00~6.00	0.30	0.3
微风化泥晶灰岩	2.65	39.0	0.70	4.00~13.00	0.30	0.3
微风化白云岩	2.68	40.0	0.80	4.00~13.00	0.28	0.4
夹 层	1.90	16.7	0.05	0.05	0.45	0.0

2 原位模型试验设计

2.1 相似性原理

对于相似力学系统,各对应的基本物理量必须满足几何相似、运动相似和动力相似^[13].原位模型试验的地质条件与原型条件完全一致.现场缩尺模型在几何形状上与真实锚塞体完全相似.实际缆索荷载通过转换装置施加在锚塞体底面,模型试验采用千斤顶后推法加载,其受力特征相似.模型试验在边界条件、应力和变形上满足相似性原则要求.

2.2 原位模型设计

为研究锚塞体在不同质量围岩情况下的受力变形特性,试验模型分别按锚塞体实际尺寸的 1/30 和 1/20 缩小,锚塞体单索的设计荷载为 300 MN.1/30 锚塞体模型布置在 2 号探洞的 1 号试验支洞和 2 号试验支洞之间的岩体内,岩石新鲜,完整性好.1/20 锚塞体模型布置在 2 号探洞的 3 号试验支洞和 4 号试验支洞之间的岩体内,岩体较破碎,完整性较差,夹泥层较多,夹泥厚 1~2 cm.锚塞体中心轴线仰角 45°,底面仰角 53°,顶部仰角 37°,两侧壁以 8°向中心线收敛.锚塞体模型洞的开挖采用光面爆破的方法,半孔残留率大于 90%.锚塞体采用 C40 混凝土,总的配筋要求是:后锚面为 2 层直径 12 mm、间距 10 cm×10 cm 的钢筋网,沿锚塞体环向与轴线方向均布置直径 12 mm 间距 10 cm 的钢筋,制作成钢筋笼,使锚塞体强度基本与设计西锚碇强度相似.图 1 为锚塞体模型布置.

2.3 加压及测试系统

为真实模拟隧道锚的实际受力状态,试验采用后推法进行加载.将传力钢板浇注在锚塞体模型的后部,然后安装千斤顶,使用的千斤顶规格、型号都相同,其率定曲线基本吻合,从而保证千斤顶出力的均匀性.在 1/20 的锚塞体模型后部钢板上安装 6 台 3 000 kN 千斤顶,在 1/30 的锚塞体模型后部钢板上安装 4 台 3 000 kN 千斤顶,千斤顶合力方向与锚塞体轴线方向一致,且合力作用点在钢板的形心上.然后将每台千斤顶加荷及卸荷的油路分别并联,再将油路连接在 1 台油泵上,控制加压系统的加荷及卸荷.

测试系统分为压力测试、应变测试、位移测试 3 个部分.压力测试采用精密压力表量测.锚塞体内的应变测试元件为内埋式混凝土应变计,在缩尺比例为 1/20 和 1/30 的锚塞体模型内分别安装了 23 个和 19 个混凝土内埋式电阻应变计,将应变计按不同方向绑扎在锚塞体内的钢筋上,可测试锚塞体的不同部位在不同荷载作用下的应变值,并可计算出相应的应力值.为了测试锚塞体及围岩在不同荷载下的绝对位移,在锚塞体的前部、后部分别安装槽钢作为基准梁,试验时在基准梁上安装千分表.图 2 为锚塞体模型后部测点布置示意图.锚塞体和围岩表面的位移采用数显千分表进行测量.

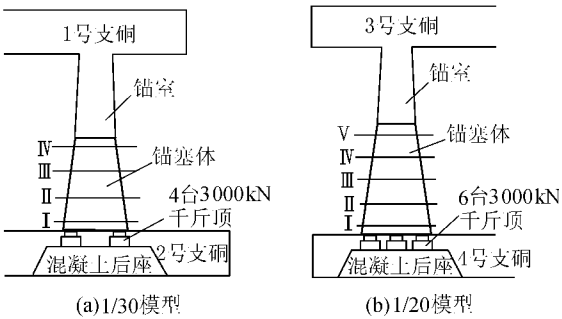


图 1 锚塞体模型平面布置

Fig. 1 Layout of anchoring concrete plug model

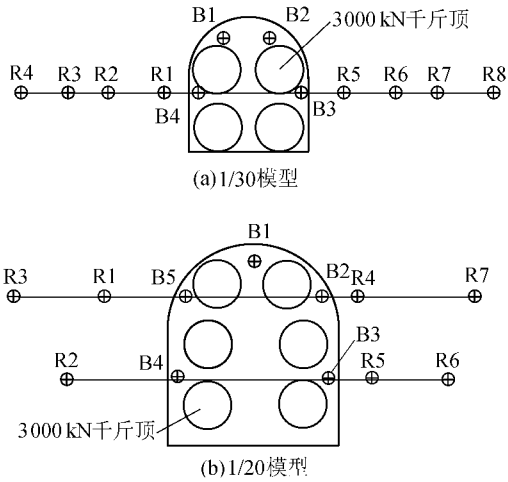


图 2 锚塞体模型后部测表布置

Fig. 2 Layout of gauges in the back of anchoring concrete plug model

2.4 加载方法

由于试验目前没有相关规范可以依照,根据《桥梁工程检测手册》^[14]中锚杆检测的相关规定及设计要求,制定加载方法及稳定标准:荷载分 8~10 级,在位移量明显增大或接近满荷载时,适当增加荷载分级,每级荷载施加完毕后,立即测读位移量,以后每间隔 5 min 测读 1 次,在位移量明显增大或接近满荷载时加密读数.连续 4 次测读出位移增量小于 0.01 mm 时,认为在该级荷载下的位移已达到稳定状态,则继续施加下一级荷载.1/20 和 1/30 锚塞体模型的最高试验荷载分别为 15 MN 和 10 MN,对应的最大应力值分别为 12.56 MPa 和 18.93 MPa.

3 锚塞体及岩体绝对位移分析

图 3 为锚塞体测点位移与加载应力关系曲线.加载过程中,除了 1/20 模型的 B4 测点外,锚塞体测点位移与加载应力之间基本保持线性变化,且曲线斜率也基本保持相同,说明锚塞体后部混凝土以及混凝土与岩体接触面之间处于弹性工作状态.图 3 还表明锚塞体在卸载过程中应力和位移呈现一定程度的非线性关系,且卸载完成后还保留一定的残余变形量.该残余变形量与混凝土的非线性和锚塞体与岩体接触面之间存在的相对位移相关.

1/30 模型试验,围岩的完整性较好,其测点加载应力与位移关系曲线更趋近于线性关系,且位移绝对值相对较小;而 1/20 模型试验围岩完整性较差,相同加载应力条件下锚塞体的位移绝对值较大.1/30 模型试验中测点 B4 在最大应力 18.93 MPa 作用下的最大位移为 0.92 mm;1/20 模型试验中相同位置测点 B4 在最大应力 12.56 MPa 作用下的最大位移达到 6.73 mm,且加载应力与位移之间呈现明显的非线性关系.由此可见,岩体质量的好坏对锚塞体的位移变形影响巨大.这种结果提示在对锚塞体的实际受力性态进行分析时,应充分考虑不同部位岩体的差异对锚塞体位移变形的影响.

除岩体完整性较差的 1/20 模型中的 R5 测点外,其余岩体测点位移与加载应力之间基本保持线性变化(图 4).锚塞体后部岩体在卸载过程中加载应力和位移也呈现一定程度的非线性关系,且卸载完成后也还保留一定的残余变形量,表明岩体的非线性应力变形特征较强.尽管测点 R1~R4 与 R7~R8 在几何空间位置上关于锚塞体对称布置,但由于岩体结构非均匀性,导致左右两侧位移值出现较大的差异.

4 锚塞体与岩体相对位移分析

图 5 为锚塞体和岩体在加载和卸载过程中不同位置处位移对比关系(图中横坐标相对距离为测点间距,零点为假定).

加载过程中,当加载应力较小时,岩体位移和锚塞体混凝土位移虽然有所不同,但差别不大,表明在低级别荷载作用下,岩体与混凝土锚塞体基本可以协同变形.随着加载应力的增加,锚塞体混凝土的位移增加量明显大于两侧岩体位移增加量.当加载应力达到最大值时,锚塞体混凝土上最大位移为岩体位移的 5~6 倍.卸载过程中,随加载应力的减小,锚塞体混凝土位移和岩体位移差逐渐减小.卸载完成后,锚塞体残余变形仍然比岩体的残余变形值大,这说明混凝土与岩体接触面之间产生的相对滑动变形没有完全得到恢复.1/30 模型锚塞体的最大残余变形约为 0.26 mm,岩体最大残余变形为 0.12 mm;1/20 模型锚塞体的最大残余变形

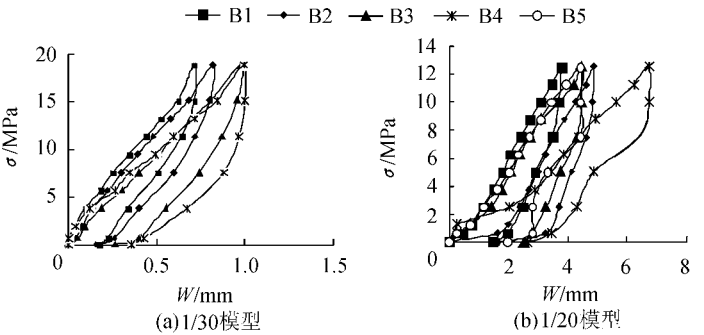


图 3 锚塞体位移与加载应力关系
Fig. 3 Relationship between displacement of anchoring concrete plug and loading stress

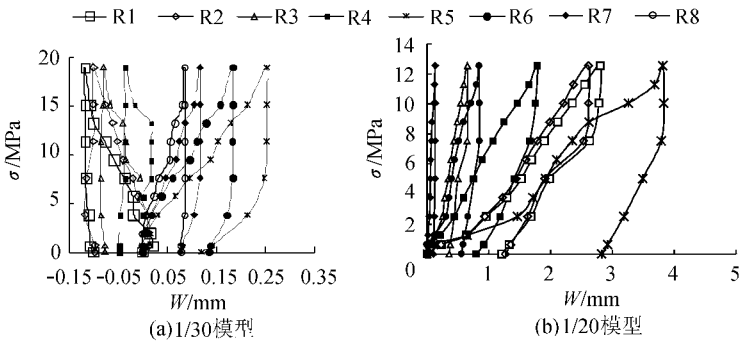


图 4 岩体位移与加载应力关系
Fig. 4 Relationship between displacement of surrounding rock and loading stress

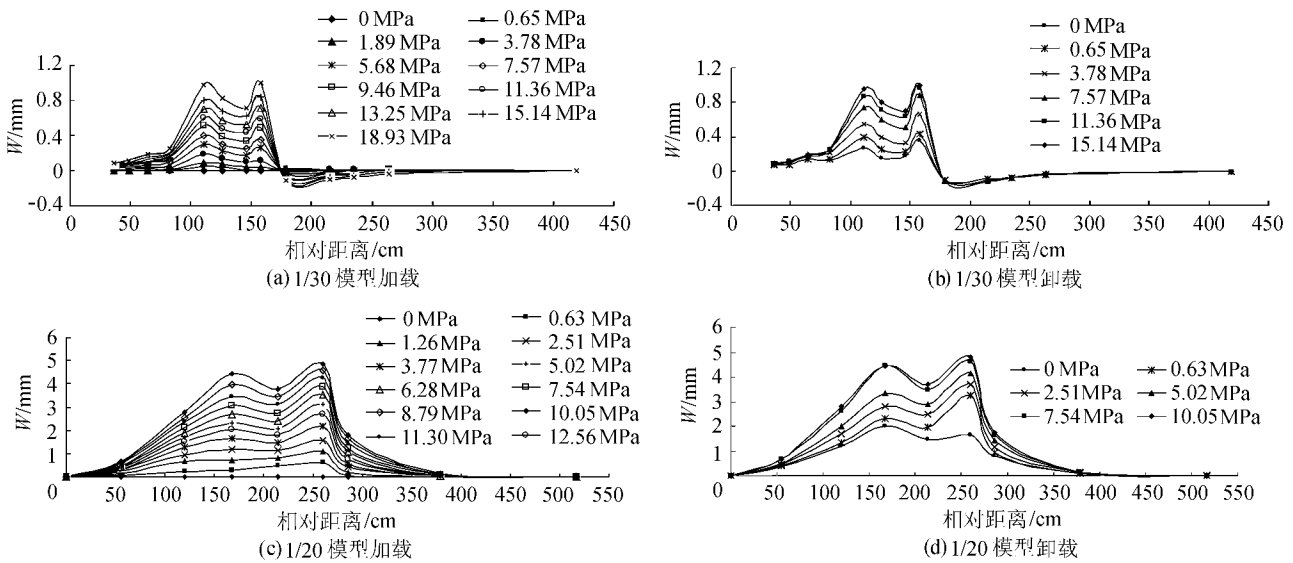


图 5 锚塞体模型后部测点各级压力下的位移曲线

Fig. 5 Displacement curves of measuring points in the back of anchoring concrete plug model under various pressures
约为1.98 mm,岩体最大残余变形 1.20 mm.锚塞体残余变形与岩体残余变形差值表明锚塞体和岩体之间接触面产生了不可恢复的塑性相对滑动位移.在破碎较严重的岩体中接触面的塑性剪切变形远大于完整岩体中接触面的塑性剪切变形.

1/30 模型试验的加载和卸载曲线表明了锚塞体混凝土位移与锚塞体左侧岩体位移方向一致,而与锚塞体右侧岩体的位移方向相反.这种结果表明岩层产状特征直接控制锚塞体周围岩体的变形性质和变形量,同时也控制岩体内应力分布.因此,在对锚塞体及岩体进行应力和位移分析时,需要考虑岩层产状对锚塞体和岩体的力学效应的影响.

5 结 语

隧道锚是悬索桥的关键受力部位,其稳定性和受力状态直接影响到大桥的安全可靠性.由于隧道锚围岩结构的差异性,隧道锚系统受力变形特性也各不相同,因此针对具体工程实际情况对隧道锚系统进行试验研究和数值分析研究是必要的.坝陵河悬索桥西岸隧道锚原位模型试验研究表明,原位模型试验可以较好地揭示锚塞体和岩体在工作荷载作用下的实际受力性状,同时为后续设计和分析提出以下建议:

- a. 在工作荷载作用下,锚塞体和岩体之间存在较大的相对位移,表明锚塞体和岩体之间有较大的相对滑动变形产生,因此设计时应充分考虑岩体和锚塞体接触面滑动特性对锚碇系统的影响.
- b. 完整性较差的岩体中,锚塞体和岩体的位移远远大于岩体完整性较好情况下的锚塞体和岩体的位移,设计时应充分考虑岩体力学性质的变化对锚碇系统的影响.
- c. 2 个模型位移测值的较大差异主要是由于围岩地质条件的差异和“尺寸效应”引起的.由于 1/30 锚塞体模型围岩条件明显优于 1/20 锚塞体模型,试验结果难以直观反映“尺寸效应”.因此试验成果应用到原型中,还必须结合地质条件进行类比和位移反演分析,研究围岩的力学特性.

参考文献:

[1] 刘建新,胡兆同.大跨度吊桥[M].北京:人民交通出版社,1996.
[2] 董志宏,张奇华,丁秀丽,等.矮寨悬索桥隧道锚碇稳定性数值分析[J].长江科学院院报,2005,22(6):54-58.(DONG Zhi-hong,ZHANG Qi-hua,DING Xiu-li,et al.Numerical analysis of rockmass stability in tunnel anchoring of Aizhai bridge[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2005,22(6):54-58.(in Chinese))
[3] 曾钱帮,王思敬,彭运动,等.坝陵河悬索桥西岸隧道式锚碇锚塞体长度方案比选的数值模拟研究[J].水文地质工程地质,2005,32(6):66-70.(ZENG Qian-bang,WANG Si-jing,PENG Yun-dong,et al.Numerical simulation on scheme comparison between two concrete-plug lengths of west tunne-type anchorage of Balinghe suspension bridge[J].Hydrogeology and Engineering Geology,2005,32(6):66-70.(in Chinese))

- [4] 朱玉,卫军,李昊,等.大跨径悬索桥隧道锚承载力分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2005,33(7):90-93.(ZHU Yu, WEI Jun, LI Hao et al. Support capability of tunnel-type anchorage of a long-span suspension bridge[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2005, 33(7): 90-93. (in Chinese))
- [5] 肖本职,吴相超,彭朝全.重庆鹅公岩大桥隧道锚碇围岩稳定性[J].岩石力学与工程学报,2005,24(增刊2):5591-5596. (XIAO Ben-zhi, WU Xiang-chao, PENG Chao-quan. Stability of the anchorage wall rock of tunnel for chongqing egongyan bridge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5591-5596. (in Chinese))
- [6] 朱杰兵,鄢爱清,黄正加,等.四渡河特大悬索桥隧道锚模型拉拔试验研究[J].长江科学院院报,2006,23(4):51-55.(ZHU Jie-bing, WU Ai-qing, HUANG Zheng-jia, et al. Pulling test of anchorage model of Siduhe suspension bridge[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(4): 51-55. (in Chinese))
- [7] 赵启林,陈斌,卓家寿.悬索桥锚碇及地基基础中的力学问题研究动态[J].水利水电科技进展,2001,21(1):22-26.(ZHAO Qi-lin, CHEN Bin, ZHUO Jia-shou. Developments in mechanical analysis of suspension bridges anchorage and foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(1): 22-26. (in Chinese))
- [8] 韩冰,王芝银,丁秀丽,等.大桥隧道锚碇三维黏弹塑性数值模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):77-82.(HAN Bing, WANG Zhi-yin, DING Xiu-li, et al. 3D visco-elasto-plastic numerical simulation for tunnel-anchorage of bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 77-82. (in Chinese))
- [9] 胡波,曾钱帮,彭运动,等.隧道锚碇围岩稳定分析及破坏模式研究[J].中国科学院研究生院学报,2008,25(4):487-492. (HU Bo, ZENG Qian-bang, PENG Yun-dong, et al. The stability and failure mode study on the tunnel-anchorage rock masses[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008, 25(4): 487-492. (in Chinese))
- [10] 胡波,赵海滨,王思敬,等.隧道锚碇围岩拉拔模型试验研究及数值模拟[J].岩土力学,2009,30(6):1575-1582.(HU Bo, ZHAO Hai-bin, WANG Si-jing et al. Pull-out model test for tunnel anchorage and numerical analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1575-1582. (in Chinese))
- [11] 曾平,陈汉珍.支井河特大桥隧道锚碇岩石力学性质试验[J].土工基础,2004,18(5):16-18.(ZENG Ping, CHEN Han-zhen. Testing on mechanical property of rock mass in anchored area of Zhijing river bridge[J]. Soil Engineering and Foundation, 2004, 18(5): 16-18. (in Chinese))
- [12] 赵海斌,于新华,彭运动,等.坝陵河大桥西锚碇区岩土力学试验研究报告[R].长沙:中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,2005.
- [13] 林韵梅.试验岩石力学模拟研究[M].北京:煤炭工业出版社,1984:10-94.
- [14] 刘自明.桥梁工程检测手册[M].北京:人民交通出版社,2002.

In situ tests on mechanical properties of rock surrounding tunnel-type anchors of Balinghe Bridge

ZHAO Hai-bin^{1,2}, YU Xin-hua², PENG Yun-dong³, JIANG Zhong-ming^{2,4}

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Mid-South Design and Research Institute, CHECC, Changsha 410076, China;

3. China Highway Planning and Design Institute, Beijing 100055, China;

4. Institute of Geotechnical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: In order to fully understand the deformation characteristics and stability of tunnel-type anchorages at the west bank of the Balinghe Suspension Bridge, an in situ model test system in accordance with the actual mechanical status of the tunnel-type anchorages was designed using the similarity principle based on the analysis of the rock properties of the strata in the anchorage area. The loading and test methods for the in situ tests were studied. The test results indicate that the rock mass and anchoring concrete-plug exhibit different deformation characteristics under different rock mass conditions. With a high-quality rock mass, the deformation is basically linear, and when the quality of the rock mass is lower, the deformation of the rock mass is non-linear. The shear residual deformation between the rock mass and the anchoring concrete-plug shows that a relatively large slip will occur on the contact surface under the design load. The deformation of the anchoring concrete plugs in a rock mass with good integrity is smaller than that of the anchoring concrete plugs in a rock mass with less integrity.

Key words: tunnel-type anchorage; anchoring concrete plug; in situ model test; residual deformation; relative displacement; Balinghe Bridge