

江阴长江大桥南塔墩地质力学模型试验

陈进, 黄薇

(长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430010)

摘要: 采用地质力学模型试验对江阴长江公路大桥南塔墩的稳定问题进行了研究, 试验表明, 在没有临空条件下的受力机制是以塔基沉降变形为主, 塔基斜坡在超载 2.2 倍设计荷载和斜坡坡角变陡 5.3° 情况下, 整个塔基边坡没有明显的破坏迹象, 说明边坡整体稳定具有一定的安全储备。

关键词: 地质力学; 模型试验; 相似关系; 抗滑稳定。

中图分类号: TU45 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)04-0391-04

作者简介: 陈进(1959—), 男, 教授级高级工程师, 1985年毕业于武汉水利电力大学, 获硕士学位, 2000年毕业于清华大学, 获博士学位, 主要从事结构与地基稳定研究。

江阴长江公路大桥为大跨径悬索桥, 两岸塔墩的稳定性是大桥安全运行的关键。南塔墩基岩由于倾向河床, 长江深泓又逼近南岸, 塔基可能沿着岩体中的软弱夹层向河床临空面滑动, 同时, 塔基的垂向和侧向变形也可能影响大桥正常运行, 故南塔墩的稳定问题是大桥建设中的主要工程地质问题之一, 因此, 有必要采用地质力学模型试验研究大桥塔墩的稳定问题。地质力学模型试验是 20 世纪 70 年代发展起来的一项新的试验技术, 它主要解决复杂的工程地质问题, 尤其对包含各种软弱结构面的基础抗滑稳定问题。本文主要研究南塔塔基在上部荷载作用下塔基岩体及软弱夹层的变形, 探讨可能的滑动机理和超载安全度, 并对该塔基的稳定性进行评价。

1 模型设计

1.1 地质参数和设计参数

根据与地质部门协商, 模型试验中采用的力学参数见表 1, 软弱夹层的倾角 27.5° , 岩体容重 $\gamma = 2.58 \text{ t/m}^3$ 。南塔塔基承受的主要荷载为: 垂直向下的轴力 $N = 1\,367\,000 \text{ kN}$, 向河床的弯矩 $M = 1\,200\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 水平向河床的剪力 $Q = 11\,000 \text{ kN}$ 。由于剪力 Q 较小, 试验中没有考虑。

表 1 岩层参数

Table 1 Parameters of rock mass

部位	R_c/MPa	$E_d/10^3\text{MPa}$	c/MPa	μ
D_2^{-4}, D_2^{-5}	60	4.0	0.4~0.6	0.7~0.9
D_2^{-6}, D_2^{I}	40	3.0	0.3~0.5	0.6~0.8
221 夹层	10	0.4	0.02	0.25
222 夹层	10	0.4	0.02	0.25
225 夹层	10	0.4	0.02	0.25
227 夹层	10	0.4	0.02	0.25
232 夹层	10	0.4	0.02	0.25

1.2 边界条件与地质概化

考虑到模型架的尺寸和南塔基础的地质结构, 南北方向沿桥轴线共模拟 350 m, 其中由塔基中心向北模拟到 F_{23} 断层以北。由于 F_{23} 断层以北岩层较完整和坚硬, F_{23} 断层胶结较好, 截断了塔基下的软弱夹层, 成为塔基滑动面的终端。东西方向模拟了整个南塔塔基, 宽度为 60 m。模型是以平面应力方式进行, 没有考虑侧向岩体的约束。模型中主要模拟的软弱夹层有 221, 222, 225, 227 和 232, 具体模拟情况见图 1。

1.3 模型相似系数及模型材料

根据相似关系^[1,2]和模拟尺寸, 模型的相似常数见表 2。根据表 2 的相似关系, 要求模型材料的弹模只有 15 MPa 和 20 MPa。这样低弹模的材料难以制模。由于塔基岩体较破碎, 而且绝大部分处在水下, 所以岩石容重按浮容重考虑, 这样, 模型材料容

表 2 相似常数
Table 2 Similarity constants

C_l	C_γ	C_σ	C_E	C_ϵ	C_μ
200	1	200	200	1	1

$C_l, C_E, C_\gamma, C_\sigma, C_\epsilon$ 和 C_μ 分别为几何、弹模、容重、应力、应变和摩擦力相似常数。

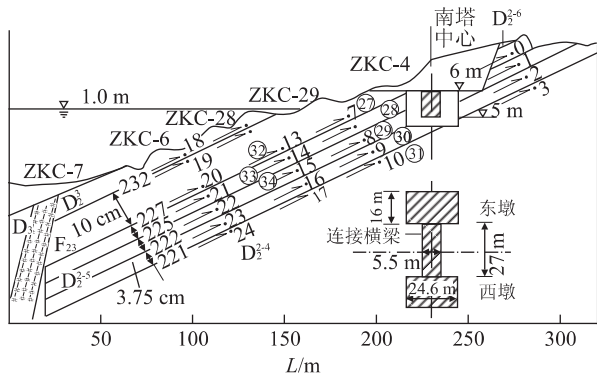


图 1 模型测点

Fig. 1 Measured points in model

重只要达到 1.58 t/m^3 就满足要求。采用加大模型材料容重,可使模型材料弹模等价提高。当材料容重增大 1.5 倍时模型材料弹模可提高到 $22.5 \sim 30 \text{ MPa}$,这样的材料容易制模。所以,江阴地质力学模型材料的特点是,高容重、低弹模和低强度。为了找到这样的材料,先后选用了重晶石粉、石灰石粉、泡沫球、硅藻土、珍珠岩粉、机油和石蜡油等不同材料不同配比的组合,共进行了 20 多组试验,对于每组材料,分别做了单轴抗压、抗剪、变形等试验,最后终于找到了基本满足上述相似关系的模型材料。软弱夹层的模拟采用塑料薄膜、电化铝薄膜中间涂二硫化钼,模拟 $\mu = 0.25, c = 0.02 \text{ MPa}$ 的夹层,并进行了验证试验。

1.4 加荷与测量

由于岩体按浮容重设计,不再考虑水的作用,边坡主要承受岩体自重和桥墩传下的荷载。塔墩轴力和弯矩采用铁珠砝码方式施加。由于考虑到仅仅超载外力不一定能使斜坡整体破坏,而且过高超载外力物理意义不明确,所以,试验中也考虑提高斜坡坡角,这等于降低夹层的摩擦系数,可观察斜坡夹层抗剪强度的安全储备。

测量仪器主要采用西德引进的高精密位移传感器,主要观察塔基的沉降和夹层的相对变形。为了观察斜坡上抬引起的变形,将测量系统与模型架连在一起,这样始终可以观察到模型相对于模型架的变

形。模型共安装了 35 个传感器,测量布置见图 1。其中编号带括号的为模型另一侧的测点。测量系统采用日本引进的 UCAM-8BL 万能数值采集系统,该系统可自动采集和实时监测测点成果,并可实时绘出图形。

2 成果分析

本次试验是分两部分进行。第一部分是当模型制造完毕,岩体自重自然形成,变形也完毕,然后按每隔 0.2 倍设计荷载分级加载,直到 2.2 倍设计荷载。第二部分是在集中力超载 2.2 倍后不卸载,用 160 kN 螺旋千斤顶每 0.295° 一级增加斜坡坡角,直到 5.32°。

2.1 集中力加载成果

所谓集中力加载是指向塔基传递的轴力和弯矩同步加载,图 2 为集中力加载成果。表 3 列出了在设计荷载成果和 2.2 倍荷载作用下全部测点的位移值。从以上成果中可以看出:在设计荷载下,最大位移在测点 5,数值为 7.19 mm,为塔基在设计荷载下的沉降量,当超载到 2.2 倍设计荷载时,该点位移值达 25.84 mm。从图 2a 中 5 号测点曲线可以看出,在 1.8 倍设计荷载下,曲线有个拐点,说明塔基变形出现屈服,从 5 号测点以下的 26 和 6 号测点的变形来看,位移明显比 5 号小,说明沉降随深度衰减较快。图 2b 为塔基上部的测点成果,从这部分的测点看,虽然有向下滑的趋势,但在 1.8 倍设计荷载以前,变形不大,而且变形较均匀。在 1.8 倍荷载以后,向下变形加剧,需注意对山体侧边坡稳定的影响。图 2c 和图 2d 主要为紧靠塔基附近用于监测夹层变形的测点,从图中可见,变形不大,相对位移也很小,在斜坡下部的测点变形更小。在整个超载过程中,并没有发现明显沿某条夹层相对滑动,说明塔基变形主要以压缩变形为主。图 2e 为塔基的水平方向测点,变形比较均匀,向河床方向变形不大,在超载到 2.2 倍时,也只有 3.4 mm。

从以上可以看出,南塔塔基斜坡,由于岩体较破碎,风化较严重,岩体整体变形模量降低,所以,以沉降变形为主要变形特征,而软弱夹层,由于没有临空条件,只是有局部剪应力集中,沿夹层的相对滑动可能性不大。主要问题是不均匀沉降问题和基坑开挖山体侧边坡稳定问题。

2.2 增加岩层倾角试验成果

在模型超载 2.2 倍设计荷载以后,由于边坡和

表 3 测点位移值

Table 3 Measured displacements

mm

测点号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
设计荷载	1.47	0.47	0.02	0.29	0.04	7.19	0.05	0.88	0.55	0.44	0.09	2.76	0.51	0.08	0.25	0.07	0.08	0.06
2.2 倍设计荷载	8.51	4.01	1.10	0.75	0.05	25.8	2.58	5.07	2.86	3.01	0.47	2.77	1.52	2.09	2.69	2.55	0.45	1.15
测点号	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
设计荷载	0.02	0.05	0.22	0.04	0.15	0.17	0.01	1.49	1.77	0.15	0.55	0.04	0.02	0.34	0.08	0.06	0.07	
2.2 倍设计荷载	1.51	1.92	2.44	2.06	2.46	1.11	0.35	3.40	3.26	3.15	4.08	2.21	0.77	1.05	0.13	1.15	0.58	

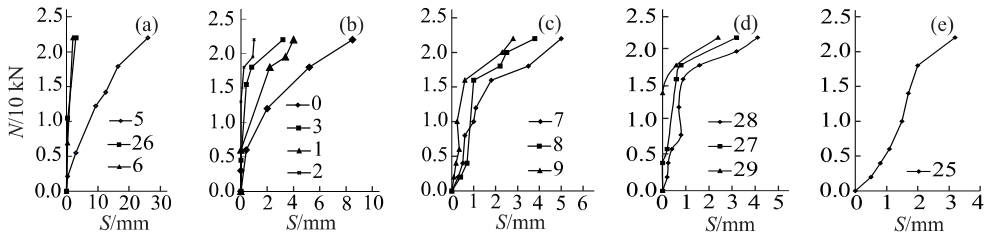


图 2 荷载位移曲线

Fig. 2 Load and displacement curves

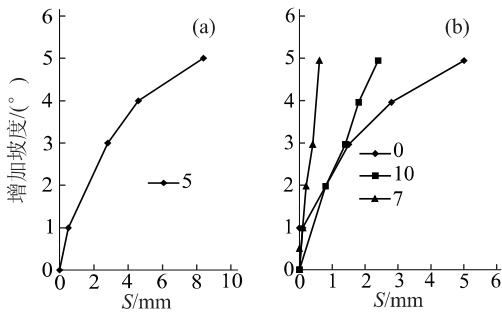


图 3 荷载位移曲线

Fig. 3 Load and displacement curves

塔基没有明显的破坏,为进一步验证塔墩斜坡在荷载作用下的安全裕度,将斜坡坡角逐渐增大(相当于降低夹层的 μ 值),但由于模型架支点改变,将测量系统重新归零,所以,图 3 中的变形是在集中力超载 2.2 倍基础上新增加的位移值。从图 3a 中 5 号测点来看,随着斜坡坡角增加,沉降量继续加大,变形主要由两部分组成,一部分是徐变位移,因为 2.2 倍的自重仍然作用在模型上,它引起的变形还随时间而缓慢增加,另一部分是由于增加坡角引起的。总的来看,当斜坡坡角增加,各测点的位移增加不大。由于螺纹千斤顶行程限制,本试验斜坡坡角只增加了 5.3° 。试验没有出现沿夹层破坏的迹象。

3 结论

(1)从整个地质力学模型试验来看:南塔塔基,

在没有临空条件下的受力机制是以塔基沉降变形为主,在设计荷载作用下,最大沉降量为 7.19 mm,有限元计算结果也证实了以上特征;(2)当斜坡在超载 2.2 倍设计荷载和斜坡坡角变陡 5.3° 情况下,整个塔基边坡没有明显的破坏迹象,说明边坡整体稳定具有一定的安全裕度。值得注意的是,由于软弱夹层的抗剪强度不足以抵抗全部下滑力,所以剩余下滑力主要由下部岩体抗力承担,软弱夹层下端有应力集中现象,岩体抗力对维持斜坡稳定有重要作用;(3)根据试验可以看出,在没有临空条件下,南塔塔基主要问题是要避免不均匀沉降,如果对塔基下部岩层进行固结灌浆处理,可增加塔基岩体的完整性,从而减小沉降量;(4)在开挖塔基边坡时,要注意塔墩山体侧岩体可能沿夹层发生滑动,建议通过优化开挖程序、适当进行削坡和其他加固处理,并进行施工期间的现场安全监测,这将对顺利施工有重要意义;(5)根据以往大量试验的经验^[3,4],采用地质力学模型试验来研究南塔塔基斜坡的整体稳定问题在技术上是可行的。本次试验由于采用的力学参数和软弱夹层的倾角都是偏于安全的,所以整个边坡的稳定是有安全裕度的。

参考文献:

[1] 陈进. 地质力学模型试验的可能发展前景[J]. 长江科学院院刊, 1986, 院庆专刊: 119-126.
 [2] 龚召熊, 陈进. 岩石力学模型试验及其在三峡工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

- [3] Chen J, Sheng T. Experiment study on the stresses and stability of Geheyan gravity arch dam of the Qingjiang River[A]. In: Hehai University, ed. Practice and theory of arch dam: proceedings of the international symposium on arch dam [C]. Nanjing: Hehai University Press, 1992.
- [4] 陈进, 黄薇. 构皮滩拱坝抗滑稳定安全度研究[J]. 长江科学院院刊, 1997, (2): 27—30.

GEOMECHANICAL MODEL TEST ON SOUTH PIER FOUNDATION OF JIANGYIN YANGTZE BRIDGE

Chen Jin, Huang Wei

(*Changjiang River Scientific Research Institute, Changjiang River Water Resources Committee, Wuhan 430010, China*)

Abstract: In this paper the geomechanical model test is used to analyze the foundation stability and failure mechanism of the south pier of Jiangyin Yangtze bridge. The test results indicate that its settlement remains a main problem since there is no opening boundary. Overloaded 2.2 times more than the design and the slope angle increased 5.3 degree, failure did not occur, which ensures the stability of the pier foundation.

Key words: geomechanics; model test; simulation relation; sliding resistance.