

吊杆式拱架结构静力特性研究

董春林 蒋允静 朱 林

(西北农业大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要 以汤峪河渡槽为例,对新型吊杆式拱架结构的内力特性进行了全面分析。结果表明,该结构与下承式桁架拱比较,具有内力分布均匀且控制性内力显著减小,无需采用预应力措施,更便于采用分块吊装拼接工艺施工;是密实砂卵石基或岩基上修建大跨度渡槽的一种经济实用的新型模式。

关键词 吊杆式拱架,弹性支承模式,竖杆式桁架拱

中图分类号 TU 375. 502

渡槽是输水渠道上跨越河谷道路的主要交叉建筑物,常规情况下,较大跨度的水工渡槽多采用拱式支承结构。因受其自重及钢筋混凝土材料特性的制约,预应力桁架拱结构应用得更为普遍,但施工工艺十分复杂;探寻既安全可靠、经济合理、又经久耐用、便于施工的大跨度钢筋混凝土拱式支承结构的设计与施工新方法,一直是水工结构工程学科长期关注的主要问题之一。陕西汤峪河渡槽净跨 46.2 m,首次成功地采用了吊杆式拱架支承结构,对修建大跨度钢筋混凝土拱式渡槽提供了新思路。为今后能在同类条件下,推广采用这种新型支承形式,本文以汤峪河渡槽为例,对其结构特性进行分析研究。

1 吊杆式拱架结构布置及其支承模式

汤峪河渡槽为槽桥结合工程,设计流量 $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$,加大流量 $6 \text{ m}^3/\text{s}$,桥面按单车道设计,净宽 4.0 m。因受行洪及空中 330 kV 高压线的限制,主河槽段 50 m 要求一跨而过,相应可供选择的支承结构也只能是下承式。在造型设计过程中,先后对下承式竖杆桁架拱、下承式斜杆桁架拱及新型的吊杆式拱架三种型式进行结构、施工及经济性综合比较,因其在结构上可以排除桁架拱中弯矩或轴向拉力过大,所造成的设计与施工上的困难,更有利于划分吊装单元和进行吊装拼接,而最终选定了吊杆式拱架结构^[1]。

1.1 结构布置

汤峪河渡槽的吊杆式拱架结构如图 1 所示。拱架两楹,按通车要求,净距为 4 m,其间由三层横系梁刚性连结而成。每楹拱架由肋拱、竖杆及两道水平梁组成,拱肋轴线为抛物线,矢高 8.19 m,计算跨度 46.2 m,矢跨比 1/5.64。按槽桥结合特点,下面的水平梁(头道梁)支承槽身,上面的水平梁(二道梁)支承桥面。为提高结构的整体性,所有节点均为刚性结点。拱肋、吊杆及两条平梁均为矩形截面,尺寸分别为 $0.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$, $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ 及 $0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 。

收稿日期 1997-12-18

课题来源 陕西省水利厅及李仪祉青年教师助教基金资助项目

作者简介 董春林,男,1964年生,讲师,硕士

从形式上看,吊杆式拱架(简称吊拱)与竖杆式桁架拱(简称桁拱)十分相似,但二者是有显著差别的。吊拱的上、下两道水平梁均被对称设置的四道结构缝断开,而桁拱两条水平梁(弦杆)都是连续的。这一形式上的差异,使吊拱的结构受力特性发生了质的变化,吊杆式拱架实际上是一种没有弦杆的新型下承式拱形结构。

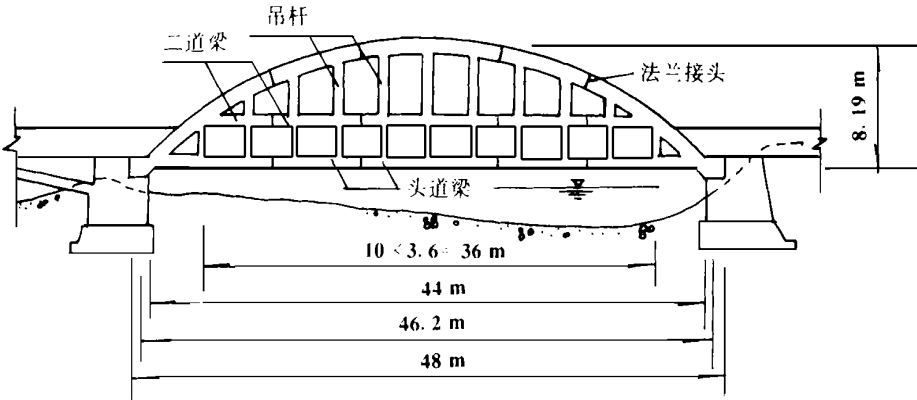


图 1 吊杆式拱架结构布置图

1.2 拱端支承模式

根据汤峪河渡槽的结构和地基特性,文献 [2]分析确定了如图 2所示的拱端支承模式:即竖向为双铰链支座,水平向为弹性支座(反力系数 K 取 1.5 GN/m)。文献 [2]还进一步论证指出,在拱架内力分析时,与固端模式比较该模式时的支座位移也相对很小(最大 1.92 mm),尚不致于对结构的内力分布产生过大的影响,用此两种模式来分别反映吊杆式拱架的结构特性均属可行。

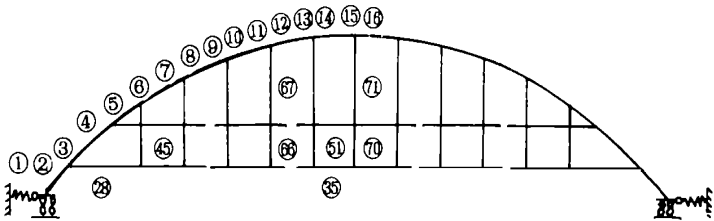


图 2 结构支承模式及单元编号

2 结构特性分析

吊杆式拱架结构的内力分析是在 MS-340中型机上,以日本的结构静力分析程序包 FEMII,分别按平面和空间静力问题进行的。拱架单元划分如图 2所示。计算结点 66个(132个),梁单元 79个(197个),边界单元 2个(4个);括号内数字为空间结点及单元数

2.1 结构内力分析

结构内力分析的荷载,包括自重、水重、桥面荷载(桥面板、人群、汽-15轮压)、温度荷载等。分别进行了 20种荷载组合的内力分析,最终选定两种最不利组合,作为结构设计的依据,它们分别为:① 自重+ 满槽水+ 升温 $25^{\circ}\text{C} + T_{5657}$;② 自重+ 空槽+ 降温 15°C ,其中 T_{5657} 指汽-15车队主轮作用于结点 56和 57中间(即①单元中间)。

表 1 自重+ 水重+ 温升 25℃+ T_{365} 时拱架内力分析成果

部位	截 面	竖杆式桁架拱(平面)			吊杆式拱架(平面)			吊杆式拱架(空间)		
		N (kN)	Q (kN)	M (kN° m)	N (kN)	Q (kN)	M (kN° m)	N (kN)	Q (kN)	M (kN° m)
主拱圈	②单元左端	- 3867. 1	458. 3	404. 1	- 3412. 1	113. 3	163. 7	- 3441. 1	118. 0	177. 0
	③单元左端	- 3053. 4	58. 6	- 74. 4	- 3164. 7	69. 0	68. 4	- 3181. 9	69. 1	74. 3
	④单元左端	- 3046. 3	- 34. 0	- 184. 2	- 3157. 9	- 27. 5	- 60. 7	- 3174. 9	- 27. 5	- 55. 8
	⑤单元左端	- 2240. 7	- 100. 6	21. 7	- 2445. 3	- 135. 8	86. 1	- 2441. 9	- 125. 9	91. 1
	⑥单元左端	- 2853. 6	24. 8	- 25. 1	- 3077. 8	102. 4	69. 7	- 3082. 9	88. 6	66. 3
	⑦单元左端	- 2845. 4	- 86. 4	- 75. 4	- 3072. 9	- 18. 7	- 138. 0	- 3077. 4	- 32. 7	- 113. 4
	⑧单元左端	- 2806. 6	40. 6	16. 3	- 3097. 2	34. 7	- 232. 7	- 3087. 0	46. 0	- 169. 4
	⑨单元左端	- 2800. 4	- 78. 8	- 62. 7	- 3090. 5	90. 5	- 300. 2	- 3080. 8	- 86. 8	- 258. 8
	⑩单元左端	- 2748. 7	39. 2	29. 9	- 2996. 9	- 2. 7	- 88. 5	- 2975. 9	34. 3	- 60. 3
	⑪单元左端	- 2743. 8	- 86. 1	- 43. 7	- 2989. 5	- 140. 5	- 83. 5	- 2970. 0	- 102. 5	- 124. 7
	⑫单元左端	- 2700. 9	48. 8	73. 5	- 2923. 9	42. 8	158. 7	- 2908. 8	25. 9	39. 0
	⑬单元左端	- 2697. 7	- 82. 0	- 15. 9	- 2920. 1	- 99. 9	80. 2	- 2904. 2	- 116. 0	- 8. 4
	⑭单元左端	- 2674. 4	68. 5	109. 2	- 2887. 0	122. 3	237. 0	- 2867. 0	111. 4	186. 6
	⑮单元左端	- 2673. 8	- 62. 8	- 14. 5	- 2889. 0	- 20. 6	16. 1	- 2868. 5	- 30. 4	- 14. 6
	⑯单元左端	- 2677. 7	14. 2	92. 2	- 2889. 6	- 46. 2	50. 1	- 2869. 1	- 52. 2	32. 9
支座	①单元	3450. 3	0	0	2880. 0	0	0	2907. 0	0	0
头道梁	⑰单元左端	- 850. 1	- 52. 5	- 154. 5	- 180. 6	- 28. 8	- 61. 2	- 187. 4	- 29. 7	- 59. 8
	⑱单元左端	- 696. 1	- 47. 4	- 93. 9	- 73. 5	- 32. 5	- 53. 4	- 78. 5	- 27. 0	- 42. 6
	⑲单元左端	- 552. 2	- 38. 1	- 67. 8	0	- 9. 0	- 16. 0	- 1. 4	- 13. 7	- 23. 6
	㉑单元左端	- 419. 3	- 38. 6	- 62. 3	- 15. 1	0. 9	- 2. 5	- 12. 7	- 1. 7	- 12. 6
	㉓单元左端	- 307. 5	- 27. 8	- 33. 0	0	- 9. 0	- 16. 0	0. 1	- 12. 5	- 21. 1
	㉕单元左端	- 240. 2	- 10. 6	2. 01	33. 8	- 29. 8	- 46. 0	21. 8	- 25. 7	- 42. 9
	㉗单元左端	- 237. 7	7. 33	35. 2	26. 5	30. 3	65. 3	15. 6	25. 0	51. 8
二道梁	⑮单元左端	- 209. 4	- 85. 1	- 121. 0	- 26. 7	- 93. 5	- 122. 3	- 30. 6	- 59. 0	- 84. 4
	⑯单元左端	- 285. 0	- 84. 0	- 121. 3	0	- 35. 8	- 40. 1	- 1. 9	- 25. 5	- 38. 3
	⑰单元左端	- 387. 0	- 74. 7	- 97. 6	4. 9	- 15. 9	- 10. 6	0. 5	- 12. 4	- 16. 7
	⑱单元左端	- 480. 8	- 83. 2	- 74. 5	0	- 77. 8	- 98. 9	- 0. 5	- 24. 5	- 35. 8
	㉑单元左端	- 539. 0	- 82. 4	- 54. 1	- 26. 4	- 97. 9	- 90. 0	- 16. 8	- 75. 1	- 74. 0
	㉓单元左端	- 539. 7	- 26. 8	1. 6	- 18. 7	0. 7	36. 2	- 9. 3	11. 0	31. 6
竖杆	⑰单元下端	142. 4	- 143. 8	- 144. 3	123. 0	- 73. 5	- 79. 5	135. 1	- 73. 3	- 76. 4
	⑱单元下端	231. 8	- 68. 3	- 73. 4	150. 6	- 100. 3	- 93. 1	179. 5	- 96. 9	- 96. 4
	㉑单元下端	152. 2	- 132. 9	- 131. 8	154. 5	15. 1	13. 6	162. 0	12. 5	13. 0
	㉓单元下端	236. 0	- 30. 9	- 54. 0	240. 1	10. 3	13. 5	267. 3	14. 9	21. 1
	㉕单元下端	140. 9	- 111. 8	- 109. 8	156. 3	- 15. 1	- 10. 2	156. 9	- 13. 0	- 13. 7
	㉗单元下端	244. 4	- 18. 0	- 40. 3	308. 1	- 10. 3	- 28. 9	254. 5	- 10. 6	- 24. 2
	㉙单元下端	134. 5	- 67. 3	- 65. 1	185. 2	- 33. 8	- 30. 0	185. 8	- 22. 2	- 18. 4
	㉛单元下端	271. 7	- 9. 1	- 23. 4	355. 8	- 7. 4	- 13. 9	360. 4	- 4. 6	- 8. 1
	㉝单元下端	133. 8	- 2. 5	- 4. 9	91. 6	7. 4	4. 1	100. 6	5. 6	2. 7
	㉞单元下端	252. 7	- 1. 8	- 3. 2	167. 6	- 0. 4	1. 1	176. 2	- 1. 7	- 2. 1

表 2 空槽+ 温降 15℃时拱架内力分析成果

部位	截 面	竖杆式桁架拱(平面)			吊杆式拱架(平面)			吊杆式拱架(空间)		
		N (kN)	Q (kN)	M (kN° m)	N (kN)	Q (kN)	M (kN° m)	N (kN)	Q (kN)	M (kN° m)
主拱圈	②单元左端	- 1350.4	- 617.6	- 1018.7	- 2387.6	57.0	- 160.0	- 2480.8	70.5	- 159.3
	③单元左端	- 2071.9	- 269.3	- 82.6	- 2169.8	1.6	- 117.3	- 2233.9	- 0.4	- 127.8
	④单元左端	- 2062.5	- 85.8	- 32.3	- 2161.3	- 60.7	- 120.3	- 2225.1	- 64.4	- 127.8
	⑤单元左端	- 1750.4	- 37.8	154.3	- 1694.7	- 79.7	63.7	- 1728.7	49.6	28.1
	⑥单元左端	- 2203.2	38.1	90.1	- 2160.0	53.4	32.2	- 2216.3	66.8	- 75.4
	⑦单元左端	- 2196.3	- 44.6	12.9	- 2153.7	- 27.4	- 76.1	- 2209.9	- 33.7	- 72.3
	⑧单元左端	- 2148.5	40.8	69.1	- 2159.2	10.7	- 100.4	- 2213.8	15.5	- 85.7
	⑨单元左端	- 2143.0	- 47.3	- 10.2	- 2152.3	- 77.9	- 121.3	- 2207.1	- 75.7	- 115.8
	⑩单元左端	2091.3	40.4	62.0	- 2084.1	15.5	29.6	- 2133.3	18.3	38.2
	⑪单元左端	- 2087.2	- 51.6	- 14.0	- 2078.8	- 76.2	0.4	- 2128.0	- 75.8	3.8
	⑫单元左端	- 2047.3	46.7	70.7	- 2032.5	33.3	141.9	- 2071.5	37.2	147.8
	⑬单元左端	- 2045.0	- 49.0	- 15.0	- 2029.5	- 61.6	80.8	- 2068.7	- 59.9	79.7
	⑭单元左端	- 2025.0	50.0	67.7	- 2006.4	88.3	176.3	- 2043.7	93.2	176.1
	⑮单元左端	- 2024.3	- 46.1	- 22.6	- 2007.9	- 6.9	16.9	- 2045.3	- 3.9	7.7
	⑯单元左端	- 2027.4	7.3	55.3	- 2008.8	37.9	25.5	- 2046.2	- 43.7	10.9
支座	①单元	765.7	0	0	2002.6	0	0	2087.3	0	0
头道梁	⑰单元左端	962.6	- 44.5	- 83.0	- 176.5	- 44.5	- 121.4	- 202.8	- 47.1	- 128.8
	⑱单元左端	1028.2	- 1.1	27.4	- 72.3	- 29.4	- 47.1	- 87.1	- 30.4	- 48.3
	⑳单元左端	1045.9	- 1.9	12.8	0	- 9.0	- 16.0	- 1.3	- 13.6	- 23.2
	㉑单元左端	1054.8	- 2.4	10.2	- 10.3	- 0.1	- 6.3	- 16.0	- 0.1	- 8.3
	㉒单元左端	1060.7	- 0.6	12.4	0	- 9.0	- 16.0	- 0.1	- 13.1	- 22.4
	㉓单元左端	1066.8	- 3.0	8.4	14.7	- 20.7	- 31.5	6.6	- 18.3	- 30.3
	㉔单元左端	1071.9	- 0.9	14.0	14.3	20.7	43.2	6.3	18.3	35.9
二道梁	㉕单元左端	179.7	- 42.1	- 18.1	11.8	- 76.2	- 94.2	10.5	- 51.5	- 73.9
	㉖单元左端	192.5	- 35.4	- 16.0	0	- 35.8	- 40.1	- 1.9	- 25.9	- 38.3
	㉗单元左端	194.2	- 33.4	- 13.9	8.3	- 28.1	- 24.8	12.9	- 8.9	- 16.2
	㉘单元左端	193.3	- 29.8	- 8.2	0	- 35.8	- 40.1	- 0.5	- 25.7	- 37.9
	㉙单元左端	189.9	- 31.5	- 10.7	- 10.4	- 53.1	- 59.2	- 3.1	- 32.3	- 44.9
	㉚单元左端	186.4	- 27.9	- 3.0	- 8.9	- 1.2	33.4	- 1.6	12.7	35.2
竖杆	㉛单元下端	86.1	- 17.7	- 18.6	59.6	- 72.3	- 74.9	65.0	- 82.2	- 82.5
	㉜单元下端	169.9	- 30.5	- 36.2	104.5	- 60.4	- 56.9	117.6	- 64.5	- 64.3
	㉝单元下端	85.7	- 8.9	- 9.5	89.1	10.3	9.7	92.9	16.6	15.4
	㉞单元下端	176.9	- 10.6	- 20.2	186.9	1.9	4.9	191.8	6.4	13.9
	㉟单元下端	83.5	- 5.9	- 6.3	88.9	- 10.3	- 10.1	93.1	- 15.5	- 14
	㊱单元下端	175.0	- 5.0	- 12.1	186.4	- 1.9	- 9.2	196.9	- 0.8	- 7.7
	㊲单元下端	87.7	- 6.1	- 6.2	109.7	- 14.7	- 15.5	111.3	- 6.4	- 7.0
	㊳单元下端	185.5	- 2.6	- 7.0	235.6	- 4.3	- 5.9	241.0	- 2.8	- 2.2
	㊴单元下端	83.2	- 5.2	- 5.2	43.9	0.4	0.2	48.7	0.3	0.2
	㊵单元下端	176.1	- 1.7	- 3.8	88.4	- 1.1	- 2.1	89.0	- 1.1	- 2.1

两种设计荷载组合的平面及空间静力分析成果见表 1 和表 2。为便于比较,表中还给出了竖杆式桁架拱的平面静力分析成果

2.2 结构特性分析

2.2.1 内力特性 由表 1 和表 2 可以看出,两种荷载组合情况下,吊杆式拱架平面及空间的静力计算成果基本一致;只是荷载组合 1 按平面问题计算时,结构缝上方的一些单元,如⑧、⑨、⑫、⑬的控制性内力稍大;也就是说,按平面问题设计,偏于安全。另外,从吊拱与桁拱平面静力分析成果的比较可以看出:

① 两结构的竖杆内力相差不大,其中轴向拉力最大的单元,吊杆式比竖杆式大近 30%。

② 二道梁的剪力、弯矩相差不大,但轴力有显著差异,吊拱均较小,可以忽略不计,但桁拱在组合 2 时有近 200 kN 拉力,组合 1 时有 210~540 kN 压力。

③ 头道梁内力,组合 1 情况,桁拱内力基本都大于吊拱,其中吊拱的轴向压力最大只有 180 kN,而桁拱可达 850 kN;组合 2 情况,吊拱最大轴向压力 180 kN,而桁拱轴力均为拉力,变化于 960~1 100 kN,显然,如此大的轴向拉力,只有采用预应力混凝土结构才能满足限裂要求。

④ 拱圈内力,主要差异在拱脚截面,组合 1 时,其剪力与弯矩桁拱比吊拱约大 3 倍;组合 2 时,桁拱轴向压力虽比吊拱小,但剪力值却为吊拱的 11 倍,弯矩也高 7 倍(达 1 120 kN·m),这也是拱脚断面难以承受的。

⑤ 支座水平推力,组合 1 为控制情况,此时,桁拱的推力要比吊拱大 570 kN,其墩台工程量势必增加。

2.2.2 结构施工特性 不论是吊拱,还是桁拱,在低槽身矮槽台情况下,如此大的跨度,且需跨河渡汛施工,一般均采用有支架预制吊装施工方法^[3],但受设备起吊能力限制以及翻身、运输等工序的影响,对重达 1 140 kN 的单樑,实施整体吊装是非常困难的。最可行的是采用分块预制、吊装拼接的施工方法。与其他支承结构相比,吊拱具有如下特性:

① 因桁拱头道梁需施加预应力,而吊拱则不需要,故其预制要简单可靠得多。

② 吊拱独特的分缝设计,可按缝划分吊装拼接单元,不仅容易满足起吊能力的要求,且在同样分块情况下可大大减少和简化接头处理。如汤峪河渡槽,若采用斜杆式桁拱,需 28 个接头,竖杆式桁拱 20 个,而吊拱仅 12 个。

③ 与单杆件吊装的肋拱等支承结构比较,吊杆式拱架是由拱圈、竖杆、两条梁组成的,其块吊单元的刚度、强度和稳定性更有利于保证,从而提高了吊装的质量、安全和进度。

3 结 论

1) 从受力角度看,吊杆式拱架结构因其内力分布均匀,控制内力显著减小而优于竖杆式桁架拱,尤其可以避免桁拱中弯矩或轴向拉力过大所造成的设计与施工上的困难,更适合在常规情况下作为大跨度渡槽、桥梁的拱式支承结构。

2) 吊杆式拱架的结构静力分析,可按平面问题处理,其计算结果用于配筋,稍偏安全。

3) 吊杆式拱架比竖杆式桁架拱更有利于吊装的单元划分和拼接,以及其他吊装工序进行。

在密实砂卵石或岩基情况下,当槽身较低,槽台较矮时,吊杆式拱架是一种值得推广的新型钢筋混凝土拱式支承结构。

参 考 文 献

- 1 沙际德,于志秋,董春林.石头河东干渠汤峪河吊杆式拱架渡槽设计.陕西水利,1992(增刊): 5~ 10
- 2 朱 林,沙际德.汤峪河渡槽吊杆式拱架支承模式选择.西北水资源与水工程,1995(3): 40~ 45
- 3 顾安国,孙国柱.公路桥涵设计手册·拱桥(下册).北京:人民交通出版社,1994

Static Features of Boom Contering Structure

Dong Chunlin Jiang Yunjing Zhu Lin

(The College of Water Resources and Architectural Engineering, North western
Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract Taking Tangyu River flume as an example, this paper gave a thorough analysis on the hypogene features of new boom contering structure. The results show that the new boom contering structure has resulted in an affine hypogene distribution and a significant reduction control hypogene without the consideration of the prestressed measure and is more convenient for construction by the lump suspension splice technique compared with the low truss arch. This structure costs less and is more practical in constructing a large span flume on rockhead and compact sandy gravel foundation.

Key words boom contering structure, elastic bearing pattern, rertical trass arch

“秦薯 4号”甘薯通过省级品种审定

在陕西省农作物品种审定委员会第二十二次会议上,西北农业大学农学系朱俊光副研究员育成的“秦薯 4号”甘薯通过了审定。

该品种是以甘薯 661-71放任组合后代选育而成,原系号为(87)72.它属于春、夏薯季节型品种,耐肥、耐旱,适应性广;对地力、栽期要求不严;无空窝,结薯多;中抗甘薯黑斑病,较耐贮藏;田间自然开花。其品质优良,适于商品性蒸烤,熟食品质干面适中,味道可口,纤维少。适宜于在关中及同类生态区作春、夏薯种植,一般春薯亩产 3 000~ 4 000 kg,夏薯亩产 2 000~ 3 000 kg,高产栽培亩产可达 5 000 kg 以上。

(罗永娟)