

低路堤大跨径钢波纹板拱桥受力特征分析

刘哲坤¹, 张炜², 曲波¹, 滕飞¹, 何强³, 胡滨^{4,5}

(1. 中铁十九局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110136; 2. 中交第四公路工程局有限公司海外事业部;
3. 西安工业大学; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司; 5. 西安中交土木科技有限公司)

摘要:通过对低路堤大跨径钢波纹板拱桥施工过程中拱内壁应变和外壁径向土压力测试,得出不同施工情况下钢波纹板拱桥的受力特征,研究结果表明:①拱周填土至拱桥高度一半时,波峰和波谷不同位置受力均发生较大变化,施工时应进行重点观测;拱顶填土过程中,波峰和波谷变化规律呈现出相似周期性和交替性的变化,且同一位置拉、压应变正好相反;②施工过程中,拱桥1/8拱、2/8拱、跨中、6/8拱和7/8拱处均出现应力集中,施工时应进行观测;③拱外径向土压力随着填土高度的增加而逐渐增大,填土初期增长幅度较小,后期快速增大,且设置加劲肋位置的径向土压力值整体较未设置的增幅大;④钢波纹板拱桥采用加劲肋技术可增加波纹板的强度和刚度,有利于结构安全稳定。

关键词:低路堤;大跨径;钢波纹板拱桥;受力特征

公路钢波纹板桥涵为拼装式结构,首次在英国农田灌溉中应用,后逐渐推广至道路工程中,经过不断的技术创新,在美国、加拿大和日本等国家多作为涵洞、通道应用,并制定了标准规范,但跨径较大的钢波纹板桥梁则应用较少。韩国在引进美国、加拿大技术后,对钢波纹管涵洞也进行了大量的应用,且对大跨径的钢波纹板桥梁也进行了应用和研究,最大跨径的钢波纹板桥梁结构可达到27 m左右,取得了显著的成果。

中国对钢波纹板结构研究起步较晚,改革开放后中交第一公路勘察设计研究院有限公司在青藏公路进行了3道试验涵洞的应用,取得了一定成果,解决了多年冻土区混凝土涵洞的冻融破坏问题。随后一些研究机构和高校对大孔径的钢波纹管涵洞、通道开展了研究。随着钢波纹管涵洞、通道在中国道路工程中的大量成功应用,不但解决了许多道路工程质量病害问题,而且取得了巨大的经济效益。

虽然钢波纹管涵洞、通道在公路工程中应用较为普遍,但对于大跨径(跨径13 m)的钢波纹板拱桥却很少有研究,施工过程中钢波纹板拱桥的受力特征也鲜有报道,因此需对其进行深入研究。

1 依托工程概况

依托工程为内蒙古海(拉尔)满(洲里)一级高速公

路桩号K1 473+975处跨径13 m的双孔钢波纹板拱桥,拱桥截面为半圆拱,矢高6.5 m,加筋方式为管外壁相邻波峰之间加筋,其中钢波纹板波距为380 mm、波高为140 mm,壁厚为10 mm(镀锌前),所用材料为Q235钢材,钢波纹板出厂时采用热浸镀锌进行防腐处理,现场人工配合吊车进行安装,所有钢波纹板安装完成后喷涂乳化漆进行二次防腐。钢波纹板拱桥路中区设置加劲肋,路基边坡位置未设置。拱顶以上填土高度为1.5 m。

2 试验方案

2.1 钢波纹板拱桥内壁应变测试方案

在波峰、波谷和波侧3个测试断面,按照钢波纹板拱桥的跨径进行划分,分别在拱脚、1/8拱、2/8拱、3/8拱、跨中、5/8拱、6/8拱、7/8拱和8/8拱处布置应变片,共计21个测点,具体布设如图1、2所示。

2.2 钢波纹板拱桥外壁土压力测试方案

分别在拱脚、1/8拱、2/8拱、3/8拱、跨中、5/8拱、6/8拱、7/8拱和8/8拱处紧贴拱圈外(沿拱圈弧线切线方向,离拱圈6 cm)各布置一个土压力盒,测试拱圈周向土压力的分布情况(图3)。分别在有加筋和无加筋的拱圈处设置两组,共18个测点。

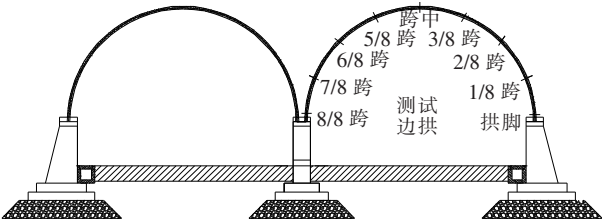


图1 钢波纹板拱桥内壁静态应变测点位置示意图



图2 钢波纹板拱桥内壁应变片布设示意图

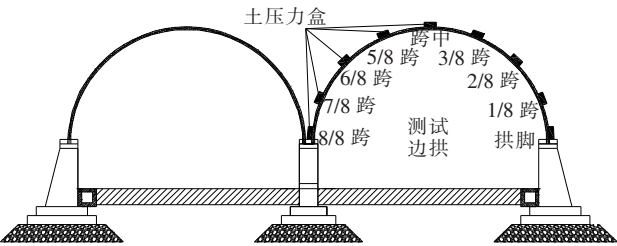


图3 钢波纹板拱桥外壁土压力盒布置图

2.3 测试工况

现场试验时,填土前对钢波纹板拱桥内壁应变片进行了布置,因此应变测试具有两种工况:即拱周填土(从拱脚位置填土至拱顶)和拱顶填土(从拱顶+0.2 m至路基顶);而土压力盒随着拱周填土高度进行埋设,因此只有一种工况,即拱顶填土(从拱顶+0.2 m至路基顶)。具体测试工况见表1、2。

表1 拱周测试工况

工况	填土高度/m	工况	填土高度/m
1	拱脚+0.2	4	拱脚+3.1
2	拱脚+1.0	5	拱脚+4.4
3	拱脚+1.9	6	拱脚+6.0(拱顶)

注:填土土质:拱周为素土;测试为填土压实后。

3 钢波纹板拱桥测试结果及分析

3.1 拱桥内壁应变测试结果及分析

3.1.1 拱周填土过程中应变测试结果及分析

(1) 波峰随填土高度增加应变变化规律(图4)。

表2 拱顶测试工况

工况	填土高度/m	工况	填土高度/m
1	拱顶+0.2	5	拱顶+1.0
2	拱顶+0.4	6	拱顶+1.2
3	拱顶+0.6	7	拱顶+1.5(路基顶部)
4	拱顶+0.8		

注:填土土质:拱顶以上素土;测试为填土压实后。

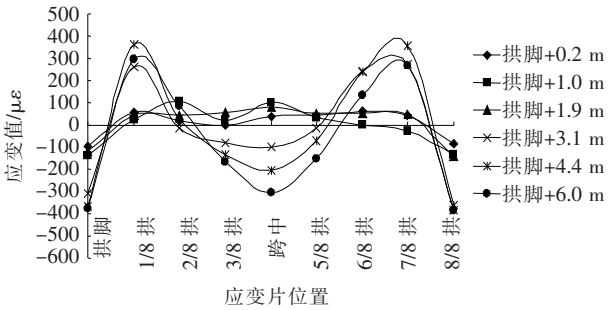


图4 拱周填土时波峰随填土高度增加的应变变化

由图4可知:①当拱周填土0.2 m时,此时钢波纹板拱桥整体表现为拉应变,其中拱脚和8/8拱处产生压应变;3/8拱处应力变化较小,几乎为零。随着填土高度的增加,拱脚和8/8拱处压应变增大,其余各位置均表现为拉应变,跨中处拉应变值最大;②当拱周填土至3.1 m时,2/8拱、3/8拱、跨中和5/8拱由拉应变转为压应变,且跨中位置压应变值变化最大。拱脚和8/8拱处的应变较大,且1/8拱、6/8拱和7/8拱处的拉应变增幅较为明显;③当拱周填土至6.0 m时,此时拱脚处压应变增加至最大,相应的3/8拱、跨中和5/8拱位置压应变增大,说明当填土高度增加,拱周土对钢波纹板桥的拱脚和两边的挤压作用不断增强;④整个填土过程中,1/8拱、跨中和7/8拱位置出现应力集中,施工时应进行重点观测。

(2) 波谷随填土高度增加应变变化规律(图5)

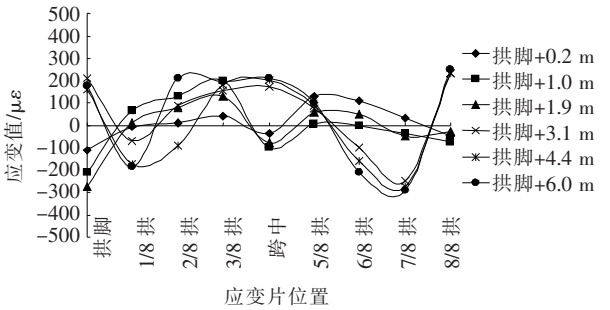


图5 拱周填土时波谷随填土高度增加的应变变化

由图5可知:①拱周填土0.2 m时,拱脚、1/8拱、跨中和8/8拱位置为压应变,其他位置为拉应变;

② 拱周填土至 1.9 m 时,拱脚的压应变增至最大,说明填土过程中钢波纹管拱桥存在从拱顶到拱脚力的延续作用;③ 拱周填土至 3.1 m 时,拱脚和 8/8 拱位置突然由压应变转变为拉应变,6/8 拱和 1/8 拱则由拉应变变化为压应变,说明随着填土高度的增加,管周不同位置存在力的重新分布过程;④ 拱周填土至拱顶时(拱脚+6 m),随着拱桥测试位置的变化,拱脚、跨中和 8/8 拱位置为较大的拉应变,而 1/8 拱和 7/8 拱位置为较大的压应变,其他位置介于几处之间且拉压应变交替变化;⑤ 随着管周填土高度的增加,拱脚附近位置(拱脚和 8/8 拱)的应变变化幅度最大,从开始的压应变转为拉应变,且拉应变值较大。说明钢波纹管拱桥各部分的受力沿着拱周向拱脚进行力的传递;⑥ 在拱周填土过程中,1/8 拱、跨中和 7/8 拱位置出现应力集中,施工时应进行重点观测。

(3) 波侧随填土高度增加应变变化规律(图 6)

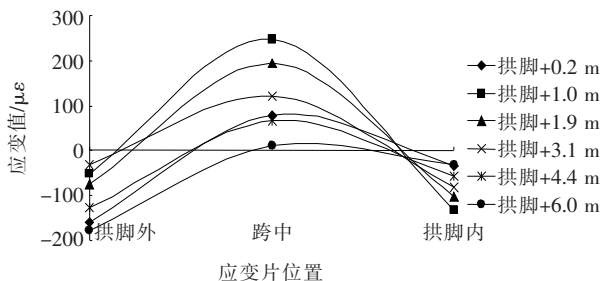


图 6 拱周填土时波侧随填土高度增加的应变变化

由图 6 可知:不同工况下,拱脚和 8/8 拱均为压应变,而拱顶为拉应变,说明随着拱桥周围填土的增加,拱脚位置的压应变值增大。拱周填土从拱脚+0.2 m→拱脚+1.0 m→拱顶过程中,各测点应变值先增大后减小。

(4) 波峰、波谷和波侧随填土高度增加应变对比

由图 4~6 可以得出:① 填土初期(拱脚+0.2 m 至 1.9 m),波峰和波谷均以拉应变为主,且应变值较小,随着填土高度的增加,填土拱脚+3.1 m 至 6.0 m 时波动较大,且应变值增大幅度较大。说明填土至拱桥高度一半时(拱桥高度为 6.0 m)钢波纹管拱桥周围受力发生了较大变化,此时施工应采取一定的支撑防护措施;② 相比较于波峰,波侧的应变值略小,跨中为拉应变,拱脚和 8/8 拱为压应变。

3.1.2 拱顶填土过程中应变测试结果及分析

(1) 波峰随填土高度增加应变变化规律(图 7)

由图 7 可知:① 随着拱顶填土高度的增加,各测试位置应变值逐渐趋向于稳定。拱脚、8/8 跨和跨中

位置附近(3/8 拱、跨中和 5/8 拱)主要为压应变,其余位置为拉应变,且不同位置的应变值规律相似,仅大小不同,说明拱桥结构整体安全稳定;② 随着测试位置的变化,应变值为拉压交替变化,整体上钢波纹管拱桥以跨中为中心,两侧呈现对称分布;③ 钢波纹管拱桥在 1/8 拱、2/8 拱、跨中和 6/8 拱处出现应力集中,施工时应进行观测。

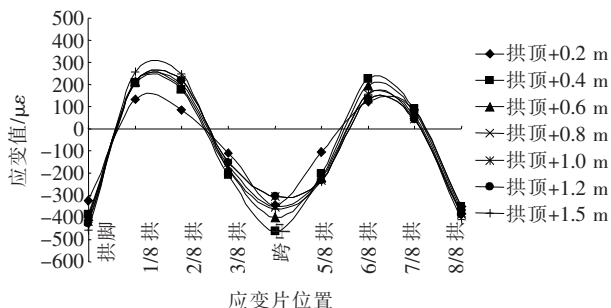


图 7 拱顶填土时波峰随填土高度增加的应变变化

(2) 波谷随填土高度增加应变变化规律(图 8)

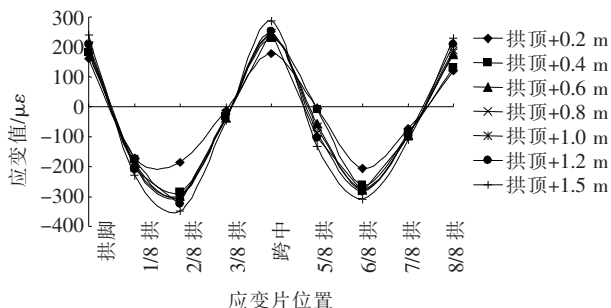


图 8 拱顶填土时波谷随填土高度增加的应变变化

由图 8 可知:① 不同填土高度下,各测试位置变化规律相似,仅数值大小不同,拱脚、跨中和 8/8 拱位置为拉应变,其他位置为压应变;② 随着测试位置的变化,整体上钢波纹管拱桥以跨中为中心,两侧呈现对称分布。钢波纹管拱桥在 2/8 拱、跨中和 6/8 拱处出现应力集中,施工时应进行检测;③ 填土至路基顶部(拱顶上 1.5 m)时,跨中、拱脚和 8/8 拱处压应变达到了峰值,2/8 拱和 6/8 拱处压应变也最大,而 3/8 拱和 5/8 拱位置应变变化较小,趋近于零。

(3) 波侧随填土高度增加应变变化规律(图 9)

由图 9 可知:① 随着拱顶填土高度的增加,拱脚、跨中和 8/8 拱处均为压应变,且先增大后减小;各位置压应变随着填土高度的增加逐渐增大;② 按照测试位置的变化,拱脚→跨中→8/8 拱过程中,压应变先减小后增大,最大压应变出现在拱脚处,为 $-293 \mu\epsilon$,小于钢波纹板的允许应变值,结构安全稳定。

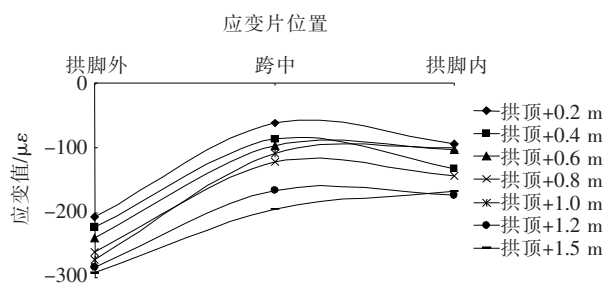


图9 拱顶填土时波侧随填土高度增加的应变变化

由图7~9可以得出:在整个拱顶填土过程中,波峰变化规律和波谷变化规律呈现出相似周期性和交替性的变化,但波峰和波谷同一位置相同工况下,拉压应变正好相反。最大应力均出现在跨中,而波侧整体上均表现为压应变。钢波纹板拱桥在2/8拱、跨中和6/8拱处应力集中,施工时应进行观测。

3.2 拱桥外壁径向土压力测试结果及分析

3.2.1 设加劲肋处径向土压力变化规律分析(图10)

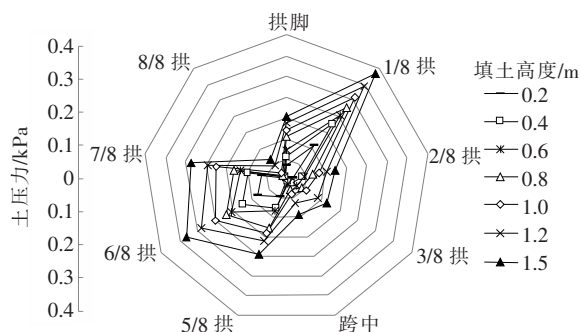


图10 拱桥外壁设加劲肋处径向土压力变化规律

由图10可以得出:

(1) 拱顶上填土施工过程中,随着填土高度增加,拱周外侧不同位置径向土压力值均逐渐增大,其中1/8拱处径向土压力变化最大。

(2) 填土初期(拱顶填土0.6 m以内),部分位置径向土压力存在波动变化,拱顶填土0.8 m及以上,各位置径向土压力大小关系基本确定为:1/8拱>6/8拱>7/8拱>5/8拱>外脚>2/8拱>3/8拱>跨中>8/8拱。主要由于8/8拱处于两孔拱桥中间填土的拱脚位置,填土范围较小,人工配合小型夯机施工压实度不够引起。

(3) 填土初期(拱顶填土0.6 m以内),各位置径向土压力增长幅度较小,填土后期(管顶填土0.8 m至路基顶部),各位置径向土压力增长幅度较大,最大土压力为0.35 MPa。

3.2.2 未设加劲肋处径向土压力变化规律分析(图11)

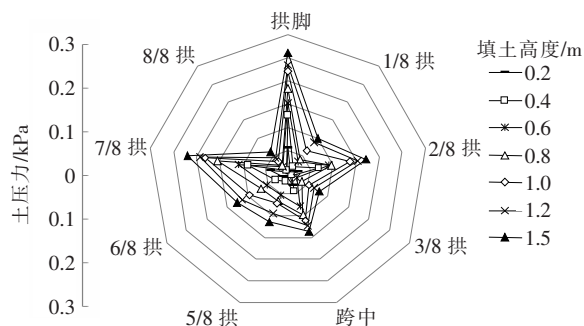


图11 拱桥外壁未设加劲肋处径向土压力变化规律

由图11可以得出:

(1) 拱顶上填土施工过程中,随着填土高度增加,拱周外侧不同位置径向土压力值均逐渐增大。拱脚位置径向土压力随填土高度增加增长幅度最大。

(2) 与加劲肋的径向土压力变化规律相似:填土初期(管顶填土0.6 m以内),各位置径向土压力增长幅度较小,填土后期(管顶填土0.8 m至路基顶部),增长幅度较大。

(3) 填土高度超过0.6 m时,径向土压力的大小关系为:拱脚>7/8拱>2/8拱>跨中>6/8拱>5/8拱>1/8拱>3/8拱>8/8拱,最大值为0.25 MPa。

(4) 与加劲肋的径向土压力对比分析可知:设置加劲肋位置的径向土压力值整体较未设置的增幅大。说明采用加劲肋技术,增加了钢波纹板的强度和刚度,钢波纹板与加筋板整体可承受更大的土压力,确保了钢波纹板拱桥的安全稳定。

4 结论

(1) 拱周填土过程中,填土初期(拱脚+0.2 m至1.9 m),波峰和波谷均以拉应变为主,且应变值较小,随着填土高度的增加,填土拱脚+3.1 m至6.0 m时波动较大。波侧的应变值相对较小。

(2) 拱顶填土过程中,波峰和波谷呈现出相似周期性和交替性的变化规律。不同填土高度下波峰和波谷各测试位置变化规律相似,仅数值大小不同。整体上钢波纹板拱桥以跨中为中心,两侧呈现对称分布,2/8拱、跨中和6/8拱处应力集中,施工时应进行检测。

(3) 拱外径向土压力随着拱顶填土高度的增加而逐渐增大,填土初期(管顶0.6 m以内),各位置径向土压力增长幅度较小,填土后期(管顶+0.8 m至路基顶部)增长幅度较大,且设置加劲肋位置的径向土压力