

文章编号:1673-9469(2024)06-0094-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.06.014

大跨径钢波纹板拱涵加强方式研究

冉赛佳^{1,2}, 刘鹏宇³, 熊保林^{1,2*}, 刘家乐^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

3. 中国铁路北京局集团有限公司 北京工电大修段, 北京 100071)

摘要: 为探究钢波纹板拱涵采取加强措施后的力学性能, 以阳泉市绕城改线工程为依托, 选择环向加强和双向加强措施, 采用数值模拟方法来对比分析钢波纹板拱涵应力与变形, 分析其加强效果。结果显示: 拱涵整体受压, 应力与变形均呈对称分布, 受螺栓连接影响, 在拱脚处应力最大, 拱腰次之, 拱顶应力最小, 最大竖向变形位于拱顶, 波峰和波谷变形一致, 应力有所差距, 拱腰处波谷应力比波峰应力大 4.83%, 拱顶处波峰应力比波谷应力大 18.78%; 采取加强措施后拱涵的应力及变形大幅降低, 拱脚处的应力集中程度减少, 但在加强处出现应力集中, 相较于波谷, 波峰加强效果更明显; 增加环向加强管钢的数量, 结构刚性也随之提高, 加强效果愈发明显, 应力最大降幅为 68.38%, 竖向变形最大降幅为 10.29%, 而轴向加强效果不太显著。

关键词: 钢波纹板拱涵; 大孔径; 加强方式; 车辆荷载

中图分类号: U449.84

文献标识码: A

Research on Strengthening Methods of Large Span Steel Corrugated Plate Arch Culvert

RAN Saijia^{1,2}, LIU Pengyu³, XIONG Baolin^{1,2*}, LIU Jiale^{1,2}

(1. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control Ministry of Education,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Beijing Track and Electrical

Overhauling Section, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: To investigate the mechanical properties of reinforced steel corrugated plate arch culverts, based on the Yangquan Ring Road realignment project, circumferential reinforcement and bidirectional reinforcement measures were selected. Numerical simulation methods were used to compare and analyze the stress and deformation of steel corrugated plate arch culverts, and to analyze their reinforcement effects. The results show that the arch culvert is under overall compression, with stresses and deformations symmetrically distributed. Under the influence of bolt connection, the stress is highest at the arch foot, followed by the arch waist, and the stress at the arch crown is the smallest. The maximum vertical deformation is located at the arch crown, and the deformation at the peak and valley is consistent, with a difference in stresses. The stress at the peak and valley of the arch waist is 4.83% greater than that at the peak, and the stress at the peak and valley of the arch crown is 18.78% greater than that at the valley. After strengthening, the stress and deformation of the arch culvert are significantly reduced, and the stress concentration at the arch foot decreases. However, stress concentration occurs at the strengthening point, and compared to the valley, the peak strengthening effect is more obvious. By increasing the number of circumferential reinforcement pipes, the structural rigidity also increases, and the rein-

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 河北省重点研发计划资助项目(20375504D)

作者简介: 冉赛佳(1998-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 从事路基沉降变形方面的研究。

* 通信作者: 熊保林(1977-), 男, 湖北随州人, 博士, 副教授, 从事路基沉降变形及稳定控制方面的研究。

forcement effect becomes more pronounced. The maximum reduction in the stress is 68.38% and the maximum reduction in the vertical deformation is 10.29%, while the axial reinforcement effect is not very significant.

Key words: steel corrugated plate arch culvert; large aperture; strengthening method; vehicle load

钢波纹板拱涵由于自身的波纹特征,具有良好的环向刚性及轴向柔性,且对地基承载力要求低,预制拼装施工速度快,在公路建设中得到广泛应用^[1]。针对波纹板涵结构的受力和应用地区,国内外众多学者进行了回填施工、静动荷载、地震作用、长期受力、高山斜坡和冻土区域等方面的研究^[2-7]。当钢波纹板涵跨径较大、填土较高时,需设加强措施来保证结构的安全。贺文涛等^[8]在拱脚处设波纹钢系杆来平衡水平推力,增加桥梁刚度和承载能力;褚夫蛟等^[9]在管涵下设置混凝土支撑,得到管涵环向、轴向应变的分布规律及涵外土压力的变化趋势;孙希波等^[10]提出方钢加强波纹钢的组合形式,通过模型试验得到应变、土压力和位移的变化,分析了土体模量和波纹钢板厚度对结构内力的影响;李百建等^[11]在板涵顶部增加混凝土减压板,基于刚度等效原理进行有限元模拟,研究动静荷载作用下结构轴力与弯矩的变化;王罡等^[12]通过加载试验研究双层波纹钢混凝土结构的承载能力及破坏模式,分析了混凝土厚度和强度、波纹钢厚度和强度、连接键对受力性能的影响;刘保东等^[13]选择在拱脚、环向及双向区域设置混凝土复合肋来改善结构的受力,对比结构的受力、变形分析加强效果;戚志河等^[14]以带加强圈的多孔钢波纹板拱涵为对象,对比结构的最大等效应力和变形,分析钢波纹板拱涵的力学响应。

目前的研究大多针对于小跨径填土管涵,大跨径填石拱涵的相关研究较少,相较于填土管涵,填石拱涵承受的土体荷载更大,结构更易发生破坏。加强措施较多选用混凝土复合肋,加强方式单一。针对填筑级配碎石的拱涵,本文以实际工程为背景,提出了一种新型的加强结构,并施加车辆荷载来分析不同数量的环向、双向加强方式下拱涵的应力与变形,研究涵周土压力及位移的变化,为拱涵的设计和应用提供一定的参考。

1 工程概况

阳泉市绕城改线工程 K14+886.5 里程处下设长 95 m、跨径 12 m 的钢波纹板拱涵,对称填筑压实度不小于 96% 的级配碎石,碎石的最大粒径为

30 cm,每层填筑高度为 0.3 m,中心填土高度约 6.3 m,下设高 1.8 m C30 混凝土浇筑的涵台,涵台与拱涵之间用角钢和地脚螺栓固定。该道路为双向四车道,设计荷载等级为公路 I 级,设计时速为 80 km/h。钢波纹板材质为 Q345 热轧钢板,表面热浸镀锌层,具体波形参数为 381 mm×140 mm×10 mm(波距×波高×壁厚),板间选用搭接形式连接,并使用 M24 高强螺栓固定,喷涂二次沥青进行防腐处理,波峰波谷位置如图 1 所示。

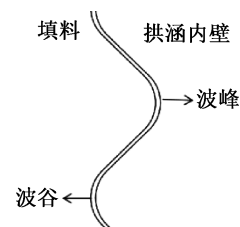


图1 波峰波谷位置图

Fig. 1 Diagram of peak and valley positions

2 有限元模拟

2.1 模型建立

钢波纹板拱涵跨中部位是易被破坏和变形的区域,故在跨中部位选取 20 个完整波形进行建模分析^[15],钢波纹板拱涵对 2.5 倍跨径外的土压力分布影响可忽略不计^[16],故两侧土体取 2.5 倍跨径,基底取 1 倍跨径,利用 ABAQUS 有限元模拟建立三维模型。土体、混凝土、钢波纹板拱涵及加强结构均选用八节点六面体线性减缩积分单元。由于碎石强度和压实度较高,在行车荷载下大多处于弹性工作状态,故采用线弹性模型,其余材料也均看作理想线弹性材料。忽略螺栓的影响,将拱涵看作整体,因碎石和拱涵间产生的滑动很小,且加强措施与拱涵间使用高强螺栓连接,相互作用均为绑定约束。模型底部为固定边界条件,两侧约束 X 方向位移,前后约束 Z 方向位移,具体模型如图 2 所示。依照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)施加双车道同向并行的汽车荷载^[17],前轮、中轮、后轮轴重分别为 30、120、140 kN,两车车轮间距为 0.6 m,具体见图 3。

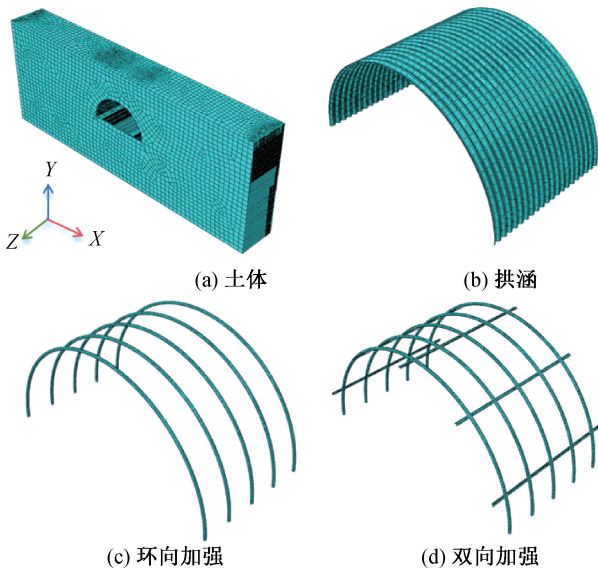


图2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

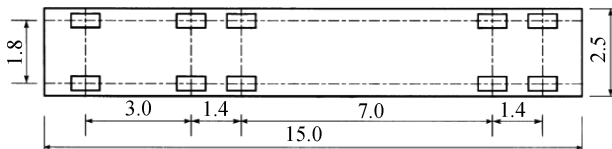


图3 车辆荷载位置(单位:m)

Fig. 3 Vehicle load position(unit:m)

2.2 工况选择及计算参数

为研究拱涵的加强效果和涵外土压力、位移分布情况,本文设计了7种方案,具体见表1。环向加强措施选用直径140mm、壁厚5mm的钢管,内部满灌M30水泥砂浆,与拱涵之间进行焊接;轴向加强方式选用12.6号槽钢,开口背离拱涵,通过加厚的垫片和高强螺栓锚固于拱涵内部。模型中涉及到钢波纹板、环向加强钢管、槽钢、涵台混凝土、水泥砂浆、碎石及基底岩层等材料,部分材料参数见表2。

表1 工况方案

Tab. 1 Working condition plan

序号	方案
I	未加强
II	跨中1道环向加强
III	跨中3道间距2.540m的环向加强
IV	跨中5道间距1.524m的环向加强
V	跨中5道环向加强+1道拱顶轴向加强
VI	跨中5道环向加强+3道以拱顶对称间隔60°的轴向加强
VII	跨中5道环向加强+5道以拱顶对称间隔36°的轴向加强

表2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
钢材	7 850	210 000	0.30
涵台混凝土	2 400	30 000	0.20
水泥砂浆	2 000	30 000	0.20
碎石	2 300	100	0.20
基底岩层	2 300	500	0.25

3 计算结果分析

3.1 拱涵应力对比分析

拱涵应力超过屈服应力后极易发生断裂,影响拱涵的结构安全,因此,对未加强的拱涵应力进行分析,波峰波谷应力对比如图4所示,以左侧拱脚为0°顺时针旋转至180°,90°对应涵顶。由图可知,应力大致呈对称分布,角度在0°~50°范围内波谷应力大于波峰应力,而在50°~90°范围内波峰应力较大,角度在0°~90°区间,应力呈先骤降后在10°附近稍上升再下降趋势,在90°附近下降至最低值,拱腰处波谷应力比波峰应力大4.83%,拱顶处波峰应力比波谷应力大18.78%。拱涵最大应力为203.33MPa,位于0°波峰位置,已超过壁厚10mm的Q345钢材在20℃下的许用应力(189MPa),因此,需要进行加强处理。拱脚位置固定后,拱腰在承受土体荷载和行车荷载作用下有一定程度上的外扩,在10°范围内应力有所增加;拱涵最小应力为57.63MPa,位于拱顶波谷位置。与波峰部位相比,波谷在各角度的应力分布差距更大,下降速度更快。

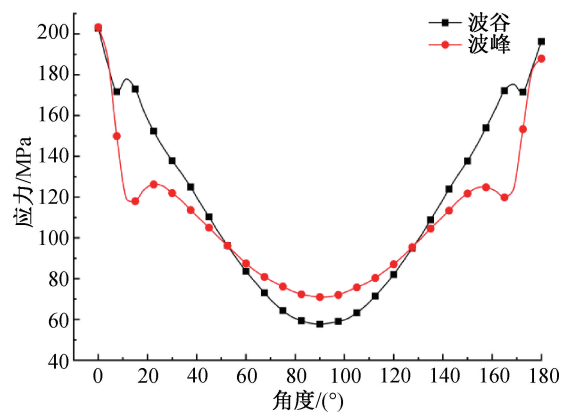


图4 波峰波谷应力对比

Fig. 4 Comparison of peak and valley stresses

对比各工况下拱涵的波峰波谷应力分布,如图5所示。采取加强措施后的拱涵应力在波峰和波谷位置的各个角度都大幅减小,最大降幅位置

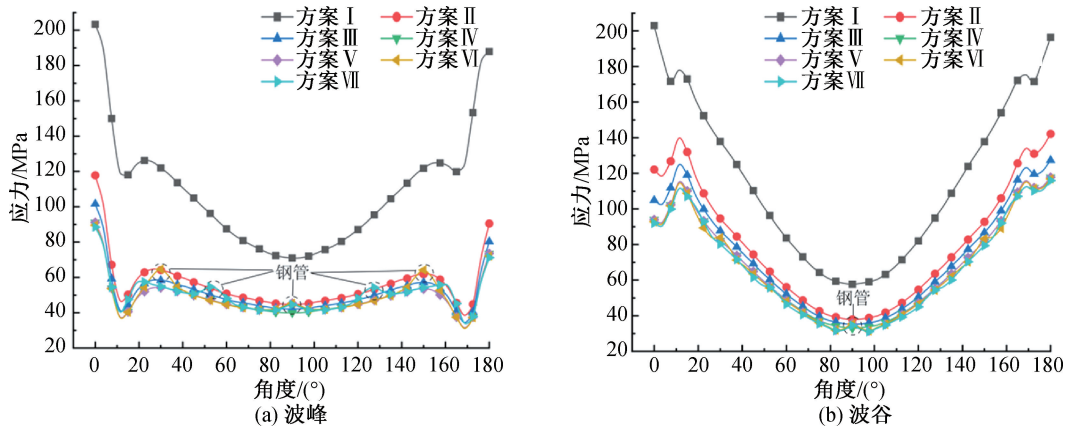


图 5 应力对比图

Fig. 5 Comparison of stresses

相同,均位于 10°附近。采取加强措施后拱涵为刚性结构,且随着环向加强钢管数量的增加,结构刚性逐渐增强。现将各方案与方案 I 进行对比分析,在波峰位置处,方案 II 的最大应力为 117.79 MPa,降低了 42.07%,最小应力为 44.88 MPa,降低了 36.75%,应力最大降幅为 60.61%;随着环向加强钢管数量的增加,应力也略有降低,方案 III 的最大应力下降了 50.03%,在 90°处降低了 40.62%,应力最大降幅为 65.22%;方案 IV 最大应力下降了 55.17%,90°处应力减小了 43.62%,应力最大降幅为 68.38%。与只有环向加强措施对比,加入轴向加强措施后波峰应力未明显降低,仅减小了约 1%,且在方案 VI 和 VII 中,能看到在槽钢位置处有一定程度的应力集中。

在波谷处,采取加强措施后的最大应力均位于 180°处,应力最大降幅位置均为 0°附近。方案 II 的最大应力为 142.17 MPa,与方案 I 相比减小了 30.08%,应力最大降幅为 39.81%,可见环向加强措施极大地减少了波谷拱脚位置的应力集中。当增加环向加强钢管数量时,方案 III 和方案 IV 0°处的波谷应力也随之降低了 48.32%、53.70%。采取双向加强措施对波谷应力的分布未见明显影响,约有 1%的应力降低作用,且只在方案 VII 中看到加强部位应力增大。

3.2 拱涵变形对比分析

由于拱涵主要用于缓解城市交通压力,变形量不宜过大。分析拱涵跨中波峰波谷部位的变形情况,见图 6,规定向下为负。从图 6 可看出,波峰与波谷的竖向变形基本一致,均以 90°为对称轴呈对称分布,形变速率在拱脚拱顶处速率较缓,在拱腰处速率较快,呈线性变化,在拱脚处波谷的形变

略大于波峰,在拱腰处,波峰变形略大于波谷;竖向变形在拱脚部位最小,约为 8.52 mm,在拱顶部位最大,约为 19.81 mm,略小于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定的最大挠度,这也验证了在工程中常监测拱顶部位的形变及采取加强措施的必要性。

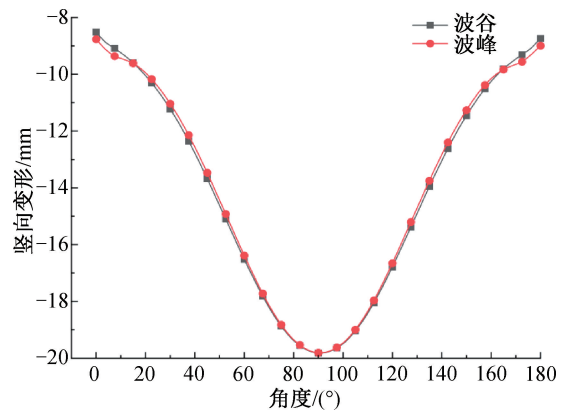


图 6 波峰波谷变形对比图

Fig. 6 Comparison of peak and valley deformations

从拱涵跨中波峰与波谷的竖向变形方面来对比分析各个加强方案的优劣,见图 7。采取加强措施后的拱涵竖向变形明显改善,在 0°~20°范围内位移基本保持不变,之后下降速率略有减缓,在拱顶处作用最为明显。增加 1 道环向加强钢管时,波峰竖向变形降低了 6.46%,而波谷减小了 4.84%。环向加强钢管的数量增加至 3 道、5 道时,最大竖向变形分别降低了 7.85%和 10.29%。当使用双向加强方案时,方案 VII 的拱顶波峰、波谷最大形变量分别为 17.55、17.63 mm,较未采取加强措施的拱涵分别降低了 11.39%、11.03%。虽然双向加强措施发挥了一定的作用,但作用并不显著,波峰、波谷最大形变量降低了约 0.1 mm。

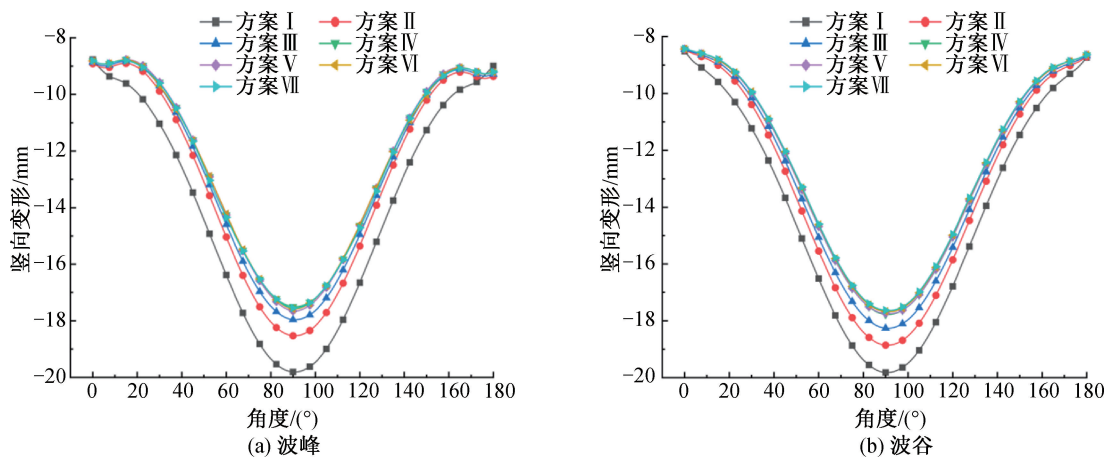


图7 竖向变形对比图

Fig. 7 Comparison of vertical deformations

3.3 土压力分析

在拱涵的设计和施工中,必须考虑的因素是拱涵上方的土压力,由于填筑级配碎石较粉、砂土密度更大,是拱涵承受的主要荷载之一,因此,对拱涵外侧波峰、波谷的土压力分布进行分析,如图8所示。涵外土压力的大致呈对称分布,在拱腰位置处土压力较大,由于 145° 处受到后轮的行车荷载较前轮荷载更大,在此处土压力最大,而拱顶部位土压力最小。与方案I相比,方案II在波峰部位的土压力只在拱脚两侧起到减小作用,其余地方作用不明显,随着环向加强钢管数量的增加,土压力在拱涵整体范围内呈减小趋势,但选用双向加强方式时,土压力在各个角度差距都不大,甚至在拱顶上方还略有增加,增加了约7.71%。将最大土压力处进行局部放大,可以发现,当只有1道环向加强钢管时,土压力基本不变,但随着环向加强钢管数量的增加,加强效果逐渐明

显,方案III和IV较方案I分别减小了4.00%和7.42%;而采用双向加强措施时,最大土压力反而增加了,且土压力随着槽钢数量的增加而增大,说明在波峰部位轴向加强槽钢对涵外土压力起到了反作用。

波谷土压力略小于波峰土压力,变化趋势与波峰基本相似,最大土压力一直呈减小趋势,说明双向加强措施效果更优。与方案I相比,方案II至VII土压力分别降低了2.01%、5.79%、8.70%、8.77%、8.96%和9.61%,环向加强钢管数量越多效果越好,但只增加1道轴向加强时,效果并不明显。

3.4 土体竖向变形分析

土体的竖向变形与拱涵的变形类似,如图9所示。波峰最小竖向形变为 -8.82 mm ,位于 0° 拱脚位置,最大竖向形变为 -19.79 mm ,位于 90° 拱顶区域。采用加强措施后,土体的竖向变形减小。与

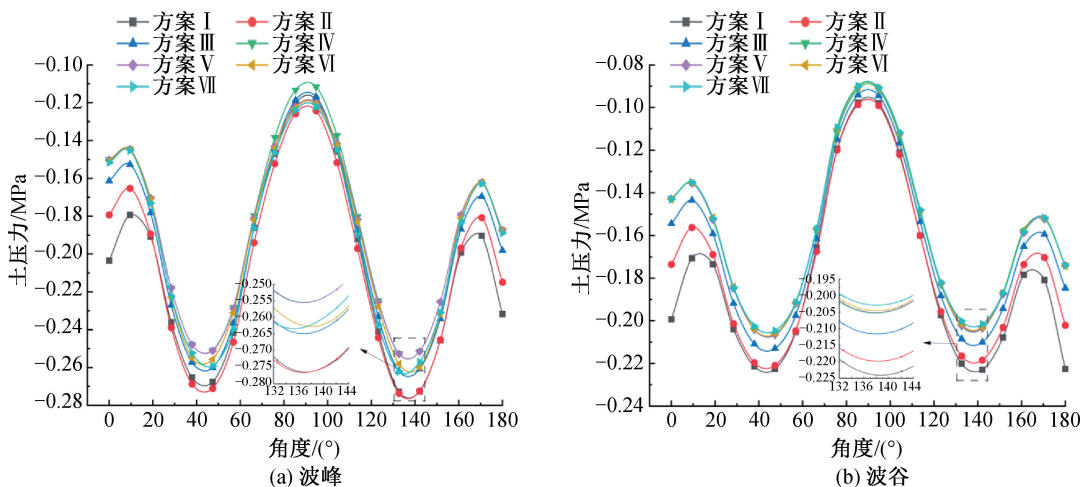


图8 土压力分布

Fig. 8 Distribution of soil pressure

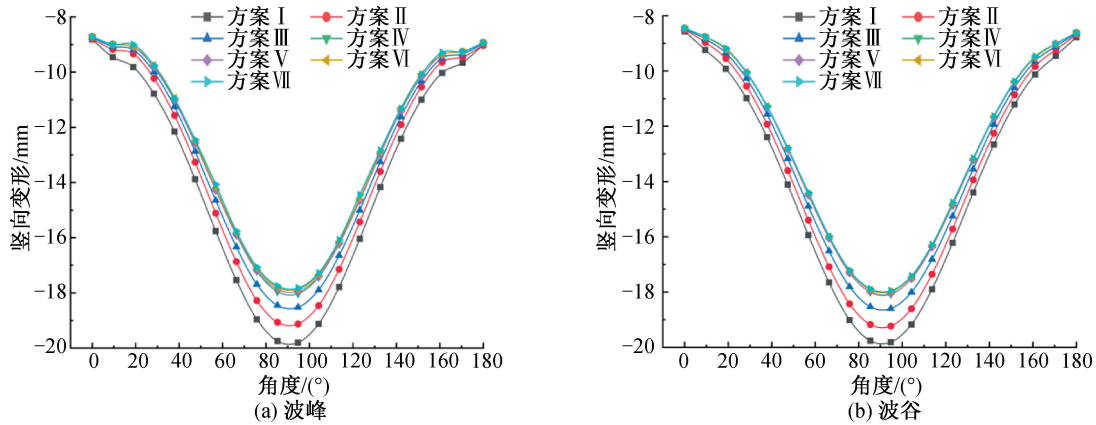


图 9 土体竖向变形

Fig. 9 Vertical deformation of soil mass

方案 I 对比,当增加环向加强钢管后,方案 II 至 IV 的波峰土体最大竖向位移分别减小了 3.41%、6.46%和 8.94%;加入轴向加强槽钢后,方案 V 至 VII 的波峰土体最大变形降低了 9.37%、9.74%和 9.97%,方案 II 至 VII 的波谷最大竖向形变分别降低了 2.93%、6.13%、8.75%、8.84%、9.20% 和 9.39%,加强方式在土体波峰位置处发挥的作用更大。

3.5 拱涵最大等效应力及变形对比

拱涵跨中并不全是最大等效应力及最大竖向变形的区域,将各加强方案拱涵的最大等效应力与最大竖向变形进行对比,如图 10 所示。采取加强措施后的拱涵最大等效应力与最大竖向变形均有一定程度的减小,其中环向加强效果更加显著,且随着环向加强钢管数量的增加,最大等效应力有明显的降低,结构由柔性向刚性转变,而双向加强作用不明显。最佳的加强形式为方案 VII,但方案 VII 与方案 IV 的最大等效应力与最大竖向变形差距较小,因此,在设计、施工中可只采用环向加强

的形式以保证拱涵正常工作,同时增加环向加强钢管的数量,减小拱涵与螺栓连接处的应力集中程度。

4 结论

1) 拱涵的最大应力出现在拱脚位置,最大竖向变形则位于拱顶;涵外最大土压力出现在 145° 拱腰处,土体最大竖向位移在拱顶区域。当选用拱涵形式时,在拱脚与螺栓固定区域易出现应力集中现象,要对此区域多加监测。

2) 采取加强措施后的拱涵可被认为是刚性结构,随着环向加强钢管数量的增多,加强效果也越显著,拱涵结构刚性也逐渐增强,且在加强钢管处有一定的应力集中现象。

3) 加强措施能大大减缓拱涵的应力和变形,降低拱脚处的应力集中,且在减小波峰应力和波谷涵外土压力作用更大。双向加强措施的效果并不明显,因此,在工程中为避免造成资源的浪费,可不使用,若必须使用,需增加轴向加强措施的数量。

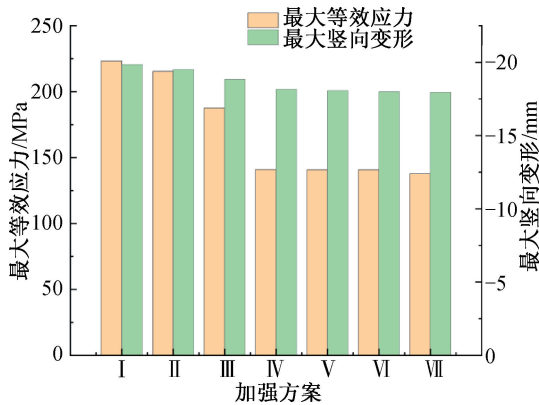


图 10 不同加强方案对比

Fig. 10 Comparison of different reinforcement schemes

参考文献:

[1] 李祝龙. 公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.

[2] 冯忠居, 乌延玲, 贾彦武, 等. 钢波纹管涵洞受力与变形特性模拟试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35 (1): 187-192.

[3] YEAO K Y, SEZEN H, FOX P J. Load performance of in-situ corrugated steel highway culverts [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2009, 23(1): 32-39.

[4] 方诗圣, 邹祥强, 黄志福, 等. 地震作用下多孔钢波纹

- 板拱桥力学分析[J]. 世界桥梁, 2015, 43(3): 69-74.
- [5] 刘保东, 徐伟博, 徐道涵, 等. 圆形截面覆土波纹钢桥涵长期受力性能试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(3): 66-76.
- [6] 陈明奎, 张钰, 姚晓励, 等. 高山地区斜坡地形下波纹钢管明挖隧道力学特性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 290-298.
- [7] 徐群丽, 季文玉. 青藏线波纹管涵洞现场试验及理论分析[J]. 中国铁道科学, 2006(6): 55-59.
- [8] 贺文涛, 刘保东, 撤刚, 等. 波纹钢-混凝土组合结构在桥梁加固改造中的应用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2019, 41(1): 104-111.
- [9] 褚夫蛟, 曾水生, 方文富, 等. 高填方大直径钢波纹管涵洞力学特性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(9): 1338-1342.
- [10] 孙希波, 刘保东, 李春昊, 等. 方钢加强式波纹钢初期支护结构模型试验与数值模拟[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2058-2065.
- [11] 李百建, 符铎, 朱良生. 基于刚度等效的钢波纹板-减压板力学特性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 131-139.
- [12] 王罡, 夏启龙, 王玉银, 等. 双层波纹钢混凝土组合拱静力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S2): 358-364.
- [13] 刘保东, 李雨株, 王全录, 等. 大跨覆土波纹钢板拱桥结构加强措施研究[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(4): 24-29.
- [14] 戚志河, 刘蕊, 陈玉珂, 等. 多孔波纹钢板拱涵的施工力学行为研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S2): 132-140.
- [15] 李雨株. 大跨径覆土波纹钢板桥涵结构的受力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [16] 赵庆. 土石坝坝下涵洞三维有限元分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- (责任编辑 周雪梅)

(上接第 93 页)

- [11] 张云, 殷宗泽, 徐永福. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 388-392.
- [12] 杨成, 杨志团, 赖远明, 等. 兰州地铁下穿黄河段同步注浆参数控制研究[J]. 兰州交通大学学报, 2019(2): 15-19.
- [13] 徐成华, 谈金忠, 骆祖江, 等. 地铁盾构施工引发地面沉降三维流固全耦合数值模拟预测[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 409-419.
- [14] 王忠凯, 徐光黎. 盾构掘进离开施工阶段对地表变形的影响范围及量化预测[J]. 岩土力学, 2020(1): 285-294.
- [15] 叶飞, 苟长飞, 毛家骅, 等. 黏土地层盾构隧道临界注浆压力计算及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015(4): 937-945.
- (责任编辑 周雪梅)