

钢波纹板-混凝土组合拱涵影响参数分析

张海君

(山西省交通规划勘察设计院有限公司,山西 太原 030012)

摘要:为探究钢波纹板-混凝土组合拱涵的参数影响效应,以某组合拱涵为工程背景,基于控制变量法分别分析填土高度、管径、壁厚与不均匀沉降4个参数对拱涵应力及变形的影响规律。计算结果表明:拱涵变形及应力与填土高度 h 、管径 R 呈正相关, $h < 25$ m时,两者随填土高度的增加线性增大, $h > 25$ m时则变为曲线增大; $R < 4$ m时,两者随管径的增加线性增大, $R > 4$ m则变为曲线递增,且变化速率明显加快;壁厚 T 为2~6 m时两者呈线性增长趋势, $T > 6$ m后,波纹管应力基本不变;水平不均匀沉降对拱涵应力影响明显,而增大管径能有效控制不均匀沉降形成的附加内力。

关键词:钢波纹板-混凝土组合拱涵;填土高度;管径;壁厚;不均匀沉降

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

0 引言

随着中国山区高速公路快速发展,高填深挖路段也急剧增加^[1]。针对该路段,拱涵结构是较为经济普遍的设计模式。目前钢波纹板-混凝土组合结构已经在中国部分管涵工程中得到了应用^[2-4]。但中国对波形钢腹板-混凝土组合结构的研究仍主要集中在大跨度桥梁上^[5],研究方向包括采用波纹钢板取代传统混凝土腹板以减轻结构自重,同时减少腹板的模板架设、浇筑混凝土等工序,从而加快施工进度^[6-8]。在钢波纹管-混凝土组合拱涵领域,魏瑞等^[9]通过现场试验分析了在钢波纹管涵洞顶部铺设柔性材料EPS板能有效减少土压力作用;王告^[10]通过数值模拟研究了大直径钢波纹管涵在不同施工方案下的受力变形特性。

综上,中国对于钢波纹管-混凝土组合拱涵的研究较少,可供借鉴的成果有限,有必要对其开展较为深入的研究。本文以某1—4 m×3.5 m钢波纹板-混凝土组合拱涵为工程背景,对比分析填土高度、管径、壁厚与不均匀沉降等因素对拱涵受力特性的影响规律,以期为该类结构的设计提供指导。

1 工程概况

某拱涵结构形式采用钢波纹板-混凝土组合截面,涵长80.086 m,波纹板采用半径 $R=2$ m、中心角 180° 的圆弧拱,波纹板结构采用波形为380 mm(波距)×140 mm(波高),钢板壁厚为6 mm,管顶覆土设计高度为15.93 m。结构布置图见图1、2。

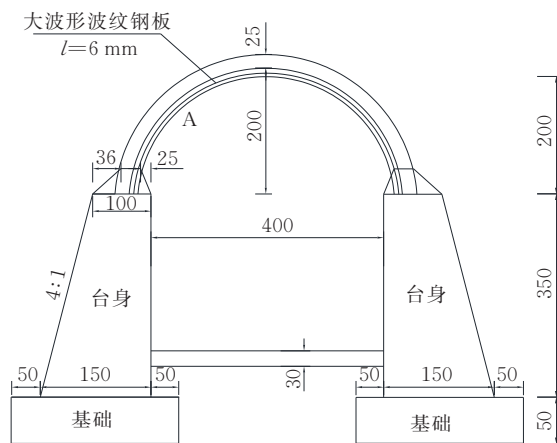


图1 钢波纹板-混凝土组合拱涵断面图(单位:cm)

波纹钢板采用Q235钢材,在波纹钢板上浇注25 cm厚的C30混凝土板,钢板与混凝土板之间通过钢筋剪力键形成联合截面。钢材、混凝土、土体的具体参数见表1。

收稿日期:2022-07-16(修改稿)

基金项目:山西交通控股集团有限公司科技项目(编号:18-JKKJ-06);山西省交通运输厅科技项目(编号:2013-1-38)

作者简介:张海君,男,硕士,高级工程师.E-mail:zhj-bridge-2008@163.com

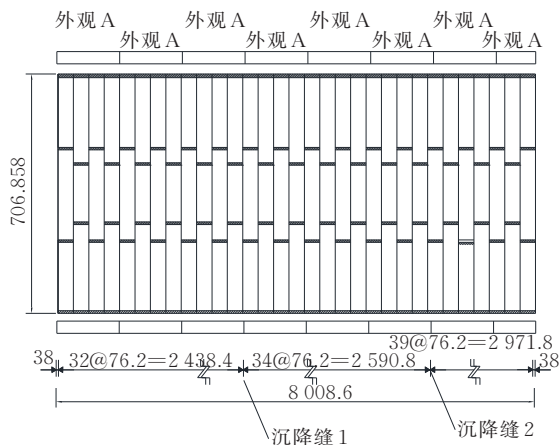


图 2 钢波纹管平面展开图(单位:cm)

表 1 材料特性

结构	弹性模量/ GPa	泊松比	线膨胀系 数/($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
Q235 波纹板	206.0	0.30	1.20×10^{-5}	78.5
土体	2.5	0.32	1.20×10^{-5}	22.0
C30 混凝土	30.0	0.30	1.20×10^{-5}	27.0

根据《公路涵洞设计细则》(JTG/T D65-04—2007)^[11],控制指标为:① 拱顶挠度容许值为管径的 2/100,截面最大竖向变形应小于拱顶;② 非闭合截面中任意点的水平变形容许值为管径的 2/100;③ 公路波纹钢涵洞结构最大等效应力安全系数取 1.5^[11];④ C30 混凝土抗压强度为 11.73 MPa,抗拉强度为 1.04 MPa。

2 有限元模型建立与验证

2.1 空间有限元仿真模型建立

建立该拱涵有限元模型,根据圣维南原理考虑 4~5 倍拱涵体积的土体作用。钢波纹板采用 Shell63 壳单元,拱涵混凝土、台身、拱涵覆盖土体采用 Solid65 实体单元^[12],两者之间采用“MPC”算法实现不同单元类型的力或位移协调,同时建立 Contal178 单元模拟土体与拱涵、基础与土体的接触行为,接触刚度取混凝土的弹性模量 $K=3.0\times 10^4$ MPa,接触单元允许的最大竖向渗透量取 0.05 mm。

网格划分采用六面体扫掠、映射划分和四面体自由划分相结合的方法,在拱涵处加密,远离拱涵的位置网格可适当稀疏。有限元模型见图 3、4。

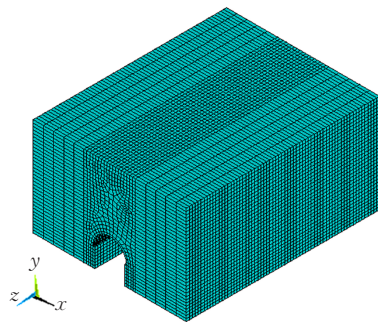


图 3 钢波纹板-混凝土组合拱涵整体模型图

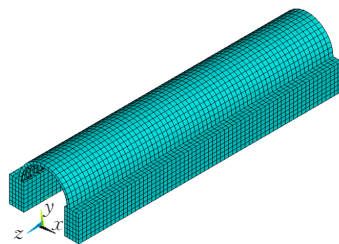


图 4 波纹板和混凝土模型图

考虑恒载和活载两部分荷载,结构恒载以惯性力施加;汽车荷载按等效土体厚度考虑。

计算工况:填土高度分别选取 15 m、20 m、25 m、35 m 和 40 m;管径在 1.25~8 m 范围内选取;壁厚在 2~9 mm 范围内选取;不均匀沉降分别选取 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm、5 mm。

2.2 模型验证

为验证该有限元模型的合理性和正确性,进行现场试验测试,对比验证以下 5 个工况:① 波纹板拼装;② 混凝土浇筑;③ 板顶填土达到 5.31 m;④ 板顶填土达到 10.62 m;⑤ 板顶填土达到 15.93 m^[10]。现场实测拱圈应力和变形与理论计算结果对比如图 5~7 所示(1~5 表示测点实测值,1'~5'表示测点理论值)。

由图 5~7 可知:在各测试工况中,测点实测的拱圈应力和变形与有限元模拟结果变化趋势基本一致,两者吻合程度较高。故可认为该有限元模型能较为精确地模拟钢波纹板-混凝土组合拱涵受力机理,验证了有限元模型的正确性和合理性。

3 各参数对拱涵受力的影响

3.1 填土高度

为研究填土高度对钢波纹组合拱涵的受力与变形特性的影响,保持管径、壁厚与土体参数不变,仅

改变填土高度,得到拱涵的应力与变形变化规律,见图8。

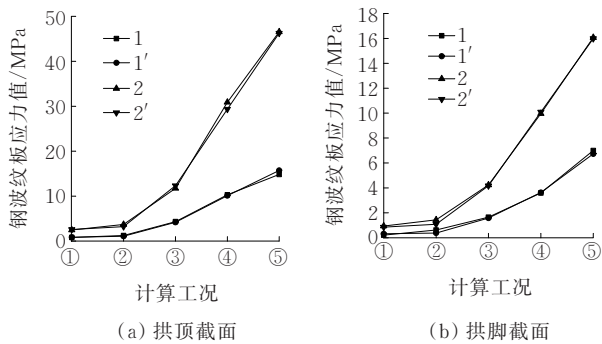


图5 钢波纹板实测与理论应力对比结果图

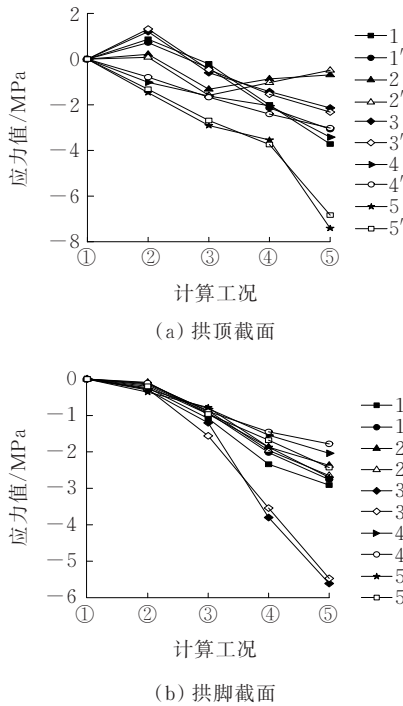


图6 拱圈混凝土最大实测与理论应力对比图

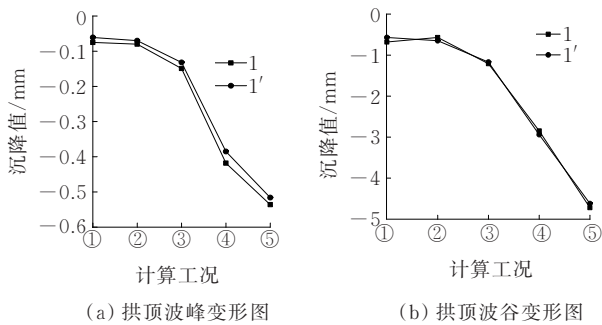


图7 拱圈变形实测与理论位移对比图

从图8可知:组合拱涵变形 δ 、应力 σ 与填土高度 h 呈正相关。 $h < 25$ m时,变化趋势基本呈线性关系,

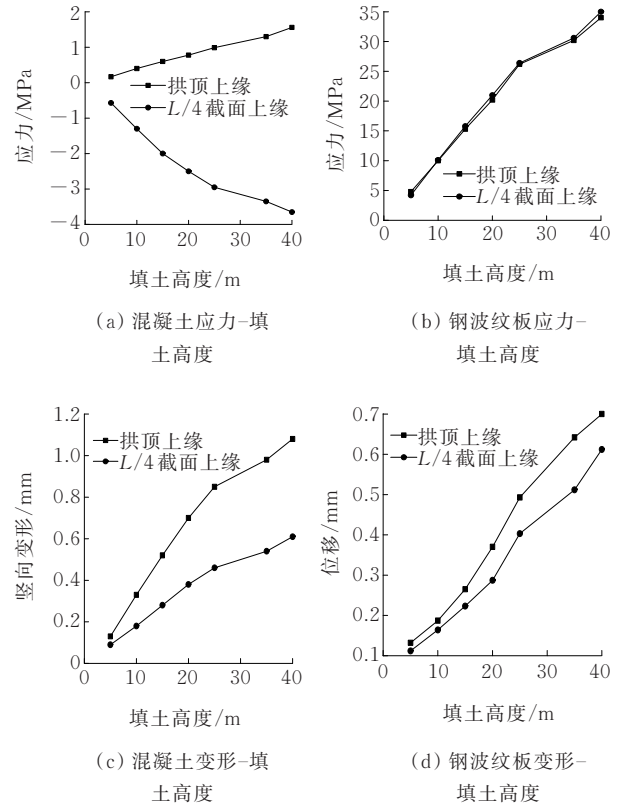


图8 填土高度对组合拱涵影响图

填土高度 h 每增加5 m,拱顶变形 δ 增大0.2 mm,钢波纹板应力增加5 MPa,混凝土应力增加0.2 MPa; $h > 25$ m,变化趋势则变为曲线。同时根据设计混凝土应力控制指标,填土高度不应超过26 m。

3.2 拱涵管径

保持矢跨比、结构尺寸与填土高度参数不变,仅改变组合拱涵管径,得到拱涵的应力与变形变化规律,见图9。

由图9可得:组合拱涵变形 δ 、应力 σ 与管径 R 呈正相关。当 $R < 4$ m时,变化趋势基本呈线性关系, $R > 4$ m,拱涵变形和应力急剧增加。因此对于该组合拱涵的管径应当控制在4 m内。

3.3 拱涵壁厚

保持土体、矢跨比参数不变,仅改变钢波纹组合拱涵的钢波纹板壁厚,得到拱涵应力与变形变化规律见图10和表2。

由图10可得:组合拱涵变形 δ 随壁厚 T 增大而减小,拱圈应力 σ 在拱顶、L/4位置呈不同变化: T 在2~6 mm范围,两者变化趋势基本呈线性关系; T 在6~9 mm范围内,钢波纹应力无明显变化。考虑材料经济性,壁厚应当控制在6 mm内。

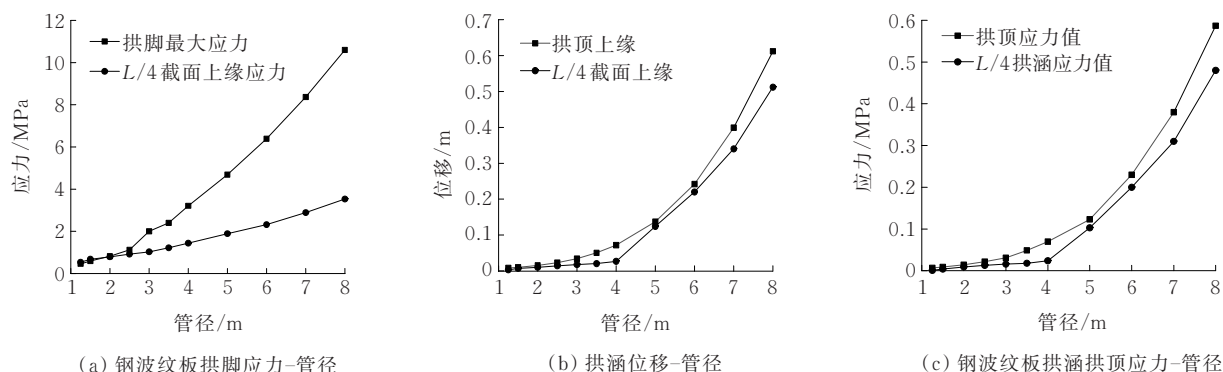


图 9 管径对组合拱涵影响

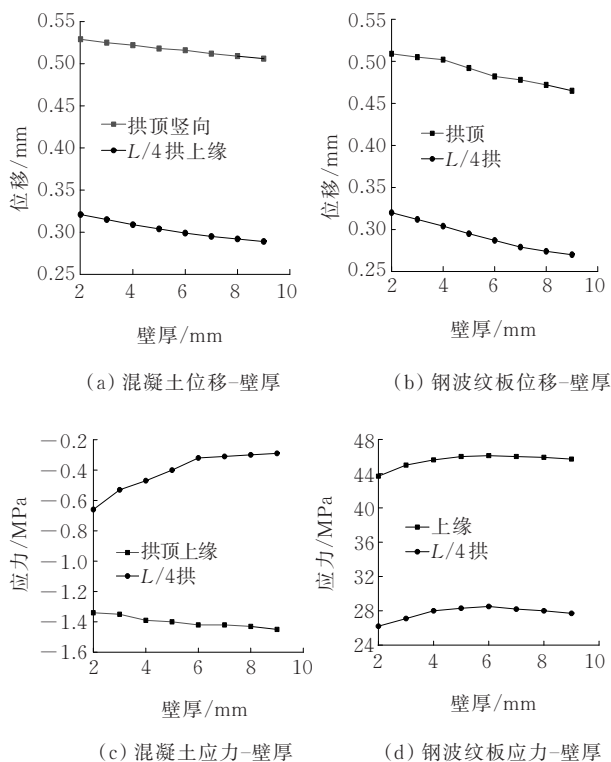


图 10 壁厚对组合拱涵影响

表 2 钢波纹管不同壁厚管顶竖向变形

钢波纹管壁厚/ mm	管顶竖向变形/ mm	钢波纹管最大等效应力/ MPa
2	0.529	43.7
3	0.525	45.0
4	0.522	45.6
5	0.518	46.0
6	0.516	46.1
7	0.512	46.0
8	0.509	45.9
9	0.506	45.7

3.4 不均匀沉降

保持矢跨比、土体和结构尺寸参数不变,讨论竖直及水平不均匀沉降对组合式拱涵应力的影响,结果见图 11。

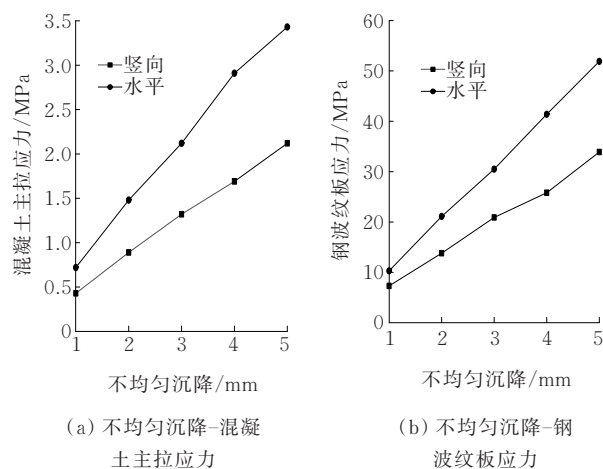
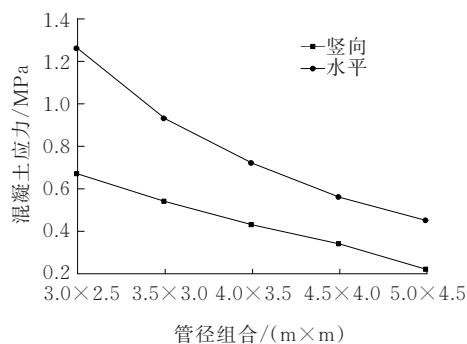


图 11 不均匀沉降对组合拱涵应力影响

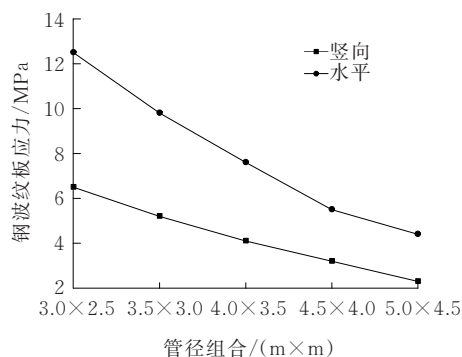
由图 11 可知:基础不均匀沉降时拱涵附加应力基本呈线性增长,但混凝土与钢波纹管最大应力出现位置分别为拱脚和板顶;水平不均匀沉降对拱涵应力的影响效应较竖向不均匀沉降更大。

为研究不同管径组合拱涵在不均匀沉降下产生的附加应力,保持土体和结构尺寸参数不变,对 1 mm 基础竖向及水平不均匀沉降引起的组合拱涵附加应力进行分析,结果见图 12。

由图 12 可知:基础不均匀沉降引起拱涵附加应力随管径的增大呈曲线下滑趋势,其中水平不均匀沉降引起的附加应力大于竖向不均匀沉降引起的附加应力。因此,在地基不均匀沉降地区,组合拱涵的管径应适当增加。



(a) 不均匀沉降-混凝土主拉应力



(b) 不均匀沉降-钢波纹板应力

图12 不同管径的不均匀沉降对组合拱涵应力影响

4 结论

以某钢波纹板-混凝土组合拱涵为研究对象,通过有限元软件分析了填土高度、管径、壁厚和不均匀沉降对组合拱涵受力的影响,得到以下结论:

(1) 拱涵变形 δ 、应力 σ 与填土高度 h 、管径 R 呈正相关,但整体变化趋势不是单纯的线性关系。以某拱涵为例,填土高度 $h < 25$ m时,变化规律为线性增大; $h > 25$ m,变化趋势变为曲线;管径 $R < 4$ m时两者为线性增大, $R > 4$ m则变为曲线递增。

(2) 壁厚 T 在2~6 mm范围时,变形 δ 、应力 σ 变化趋势基本呈线性关系, $T > 6$ m后,钢波纹板应力无明显变化。

(3) 基础水平不均匀沉降对拱涵应力影响较大,增大管径在一定程度上能降低不均匀沉降对拱涵的影响。

参考文献:

- [1] 毛鹏飞. 钢波纹管涵在南方高速上的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(2): 36-37.
- [2] 沈庆娥, 马光飞, 赵容浩, 等. 钢波纹管涵在山区高速公路中的应用[J]. 公路, 2018, 63(10): 101-104.
- [3] 陈兆南, 魏连雨, 王清洲. 公路FRPM管涵洞静载破坏试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 144-147.
- [4] 魏连雨, 陈兆南, 郑彦军, 等. 公路路基FRPM管涵洞受力变形特性研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 34-37.
- [5] 胡滨, 梁养辉, 刘百来, 等. 公路钢波纹板拱桥受力特征分析[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 120-123.
- [6] 石柱, 项超群, 上官兴, 等. 钢桁梁桥新型波形钢-RPC组合桥面板非线性有限元分析[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 86-92.
- [7] 刘琪, 聂尚杰, 徐林. 大跨长联波形钢腹板连续梁桥的隔震设计研究[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 119-124.
- [8] 谷守法, 刘小果, 李秀东. 波形钢腹板PC箱梁桥的技术创新[J]. 中国公路, 2019(11): 112-115.
- [9] 魏瑞, 曹周阳, 顾安全. 高填方大直径钢波纹管涵减荷试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 1-9.
- [10] 王告. 山区公路大直径钢波纹管涵设计施工技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [11] 河北省交通规划设计院. 公路涵洞设计细则: JTG/T D65-04—2007[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [12] 王彩君, 刘永健, 徐磊. 波纹钢拱涵受力性能影响因素初探[J]. 公路, 2015, 60(6): 74-78.