

## 摘 要

钢波纹管涵与混凝土涵在结构上有着根本不同的特性。波纹管在结构上具有横向补偿位移的优良特性,可充分发挥钢材抗拉性能强、变形性能优越的特点,能够满足多年冻土、软土、膨胀土、湿陷性黄土等因地基不均匀变形引起的涵洞结构应力的特殊需求,具有较为广泛的应用前景。

本文从国内外钢波纹管涵洞防腐性能及应用情况的详细调查研究着手,结合钢波纹管涵洞试验工程开展试验研究和室内模拟研究,计算分析不同荷载下,不同管径、不同壁厚、不同波形、不同填土高度作用下钢波纹管涵洞的受力状况,发现了随波形和位置、管径等变化而变化的应力应变规律,结合试验工程施工和观测研究钢波纹管涵洞的使用效果,进而确定钢波纹管涵洞的适用范围和适用条件,为我国钢波纹管涵洞设计提供了技术支撑。

本文调查了相关行业建筑结构和地下管道的防腐方法和措施;调研到美国等国家公路钢波纹管涵洞的腐蚀研究和防腐对策;分析了钢波纹管涵洞在土壤、水溶液和大气中的腐蚀机理,提出适用于我国的钢波纹管涵洞防腐蚀方案。

根据国内钢波纹管涵洞在公路和铁路上的施工经验和实践,分析总结出适用于我国钢波纹管涵洞的施工工艺,提出了相应的施工要求。

关键词: 公路 钢波纹管 涵洞 设计 施工

## Abstract

The corrugated steel pipe culvert is essentially different from concrete culvert on the structure. The corrugated steel pipe has the fine characteristic of horizontal compensation in displacement, and use steel fully as strong stretching resistance and ascendant distortion. The steel corrugated pipe can meet the special requirement of culvert structure stress that caused by uneven distortion of the ground from permafrost and soft soil, and yellow soil expansive soil etc. So it has extensive application prospects.

This paper investigates the detail information of the corrugated steel pipe culverts about the usage and the performance in inner and outer country. Combined with the experiment of the corrugated steel pipe culverts on spot, the writer carries out indoor simulations, computes the stress and strength station of corrugated steel pipe culverts in different load, different pipe diameter, different wall thickness, different wave form, different filling height. The writer finds the rules about the stress which different with different wave form and position, etc. According to the effect of the steel corrugated pipe culverts as doing experiment and the construction, the writer confirms the scope of application and suitable condition of the corrugated steel pipe culverts, which can pave on the base of the design of the corrugated steel pipe culverts in our country.

This paper investigates the antiseptic method and measure of the relevant trade building structure and underground piping, corrosion research and antiseptic countermeasure of highway corrugated steel pipe culverts in the country as U.S.A., etc. It also analyses corrosion mechanism and influence factor that corrugated steel pipe culverts in the soil, aqueous solution and atmosphere; and proposes the scheme of antiseptis of corrugated steel pipe culverts suitable for our country.

According to the domestic construction experience and practice on the highway and railway of corrugated steel pipe culverts, this paper summarizes the construction craft of the corrugated steel pipe culverts suitable for our country, and put forward the corresponding construction requirement.

## Keywords

Highway Corrugated steel pipe Culverts Design Construction

## 第一章 研究目的及意义

### 1.1 课题的提出

众所周知,钢具有良好的延性,抗拉、抗压、抗剪强度均较高,钢结构构件断面小、自重轻,钢结构工程往往施工速度快,且可提供大跨度结构。1996 年,我国钢产量首次突破亿吨大关;1998 我国钢产量已达 11434 万吨,而且每年增产 200~300 万吨;2004 年我国钢产量达 2.6 亿吨。钢产量的增长为发展我国建筑钢结构建设事业创造了极好的时机。随着科学技术水平的不断提高和我国钢材工业的发展,空间钢结构越来越得到人们的青睐。钢波纹管材料是一种典型的空间钢结构。

在锅炉、化工、船舶及压力容器、水利等行业中,金属波纹管多作为膨胀节使用,主要依靠波纹管易拉伸、压缩或弯曲的性能,举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程中引水压力管道在厂、坝之间设置的伸缩节,该伸缩节内的波纹管水封采用薄壁、多层、加强 U 形。

对公路涵洞来说,涵洞的不均匀变形是其破坏的主要型式之一。从材料与结构和功能的本质关系上分析,采用柔性、高强度的钢波纹管涵洞,不仅具有适应地基与基础变形的能力,可以解决因地基、基础不均匀变形导致的涵洞破坏问题,而且钢波纹管涵洞由于轴向波纹的存在可以更大程度上分散荷载的应力集中,更好地发挥钢结构的优势;尤其在多年冻土、软土、膨胀土、湿陷性黄土等不良工程岩土地区,利用钢波纹管结构修筑涵洞更具有优势,也更具有广阔的应用前景。

研究资料表明,公路钢波纹管涵洞具有以下优点:

- (1) 跨径较大时,工程实际造价比同类跨径的桥涵低;
- (2) 自重轻,运输方便;
- (3) 施工简单,施工工期短,可采用拼装施工;
- (4) 采用标准化设计、生产,设计简单,生产周期短;
- (5) 集中工厂化生产不受环境影响,有利降低成本,控制质量;
- (6) 拼装施工、现场安装方便;
- (7) 减少了水泥、块片石或碎石、砂等的用量,有利于环保;
- (8) 有利于改善软土、膨胀土、湿陷性黄土、多年冻土等特殊地基结构物处的不均匀变形问题,提高了公路服务性能,降低了工后养护成本;
- (9) 解决了北方寒冷地区冰冻对桥涵混凝土结构的破坏问题,具有优良的抗疲劳

性能:

(10) 对地基扰动小, 对基础要求较低, 具有较强的适应变形能力。

## 1.2 国外研究现状

1784 年波纹管最早诞生于英国, 1896 年美国率先进行波纹板通道、涵管的可行性研究, 并首次用于涵洞工程中。1913 年英国苏格兰爱丁堡近邻的农田灌溉首次应用波纹板涵洞, 1923 年美国铁路工程协会对伊利诺斯州中央铁路的波纹板通道进行了测试, 1929 年加拿大首次将波纹管用于一煤矿建设中, 1931 年澳大利亚首次建成跨径 8m 的波纹管(板)汽车通道一座, 1990 年《日本高速公路设计规范》制定了波纹管设计技术规范。波纹管在世界各地的安装使用证明此类结构物具有广泛的适用性, 而且其寿命已超过了设计寿命。

在美国、加拿大等国家, 公路工程广泛应用波纹管涵, 并制定了设计、制造及施工安装手册, 积累了较为成熟的波纹管涵设计方法及修建经验, 关于设计多为较保守的经验方法。美国钢铁研究会 AISI 出版的 Modern Sewer Design(1999 年版), 系统的讨论了钢波纹管排水管道和涵洞的应用、设计、施工。从国外的研究与应用看, 国外对钢波纹管涵洞的受力研究较少, 研究主要侧重在防腐问题上, 主要有以下研究及结论。

### 1.2.1 加利福尼亚州的研究

美国加利福尼亚州调查了数百道未经特殊维养处理的钢波纹管涵洞的环境条件和使用寿命, 考虑了钢波纹管涵洞耐久性与土壤腐蚀、水腐蚀的关系, 并得出了预估寿命与 PH 值和电阻率的方法和如图 1—1 所示的设计图, 该图被美国钢铁研究会(AISI)作为规范。

### 1.2.2 美国钢铁学会的研究

1978 年, 美国钢铁学会 AISI 针对 81 个道位于佛罗里达州、明尼苏达州、达科塔南部、犹他、加州、俄亥俄州、印地安那州、北卡罗莱那州、维吉尼亚马里兰和堪萨斯州的钢波纹雨水管进行了调查。研究表明, 81 道雨水管中 77 道保持良好状况。雨水管的使用时间为 16~65 年。四道需要维修的平均使用 32 年, 1 道处于极端腐蚀的环境中, 电阻率只有 260  $\Omega \cdot \text{cm}$ , 大幅度低于极小值。

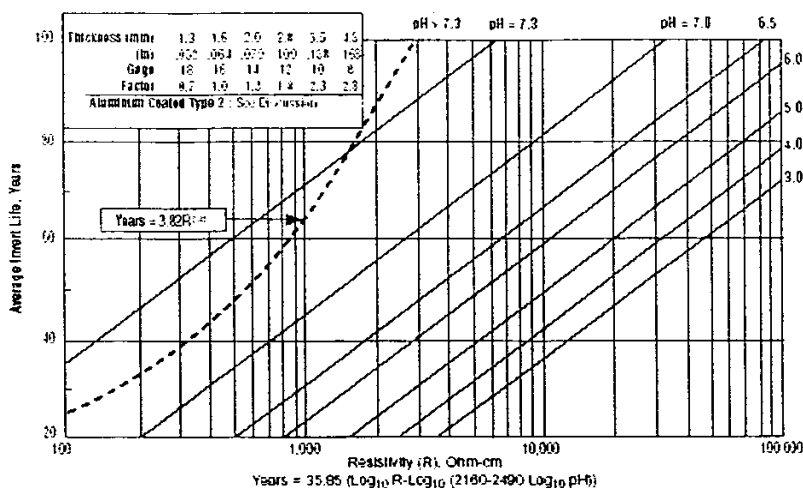


图 1-1 镀锌钢波纹管平均服务寿命美国钢铁学会图

### 1.2.3 美国钢波纹管协会/美国钢铁学会的研究

1986 年, 美国钢波纹管协会 NCSPA 与美国钢铁学会 AISI 合作, 调查研究了 22 个州钢波纹雨水管和涵洞的使用条件及腐蚀。钢波纹管采用镀锌和涂沥青处理, 使用时间 20~74 年, 土壤电阻率 1326~77000  $\Omega \cdot \text{cm}$ , PH 值 5.6~10.3。研究表明在大部份管中土壤环境的腐蚀较小, 严重的腐蚀主要在管内壁, 涂装后的钢波纹管系列在一些土和水环境下可提供 100 年的寿命。

### 1.2.4 最新的调查报告

1998 年美国纽约州对使用 6~10 年的钢波纹管进行调研, 2001 年 6 月美国钢波纹管协会对 20 道使用 9~13 年的涵管进行了钢波纹管聚合物涂层现场性能测试研究, 并于 2002 年 3 月整理出报告。结果表明防腐蚀采用镀锌+聚合物+沥青时, 20 道涵管除 1 道外, 其余 19 道处于良好状态。聚合物涂层总体上粘结紧密, 表层沥青仅在端部出现裂缝, 聚合物涂层很少受到损坏, 除端部局部涂层剥落外, 锌层基本未出现腐蚀现象。

同样, 2001 年 8 月美国钢波纹管协会对 Wisconsin 州的不同涵管进行了相应的调查, 结果表明 5 道使用聚合物涂层 27 年仍能保持良好的防腐蚀效果, 仅在端部局部出现剥落现象。

### 1.2.5 其它研究

20 世纪以来加拿大已经开展了许多研究, 其中最早的是 1967 年 GOLDER 开始的研究。安大略省西南方的钢波纹管试验证实在当地条件下用图 1-1 预测服务寿命是合适的。

1993 年,英国哥伦比亚运输部检查了 21 个钢波纹结构板和有镀锌保护层的内壁,安装时间超过 20 年,最早的是在 1933 年安装的。试验将 37mm 直径的管取样片,在试验室检测覆盖层厚度,同时检测土壤和水 PH 值和电阻率,试验表明除 2 个结构外,预计服务寿命超过 100 年。

1988 年,亚伯达省开展了一个综合研究,检测 201 个安装管的锌损失,测量土壤和水的 PH 值、电阻率以及管和土之间的电位。研究表明:钢波纹管平均寿命的期望值为 81 年,最小 50 年的寿命可达到 83%。

美国钢铁研究会研究表明,在大多情况下,钢波纹管(雨水管)的坡度不大时,基本没有水流带来的泥砂冲刷腐蚀问题。然而当流速较高时(大于 5m/s)腐蚀将变得较明显,并有泥砂磨蚀随之而来。如果砂石在管内壁冲洗,磨耗量将增加。

### 1.3 国内钢波纹管涵洞的应用

解放前及解放初期我国也曾应用过波纹管涵,20 世纪 50 年代修建青藏公路不冻泉段时曾将波纹管涵应用于抢修工程,到 70 年代开挖出时发现其使用状况良好。1965 年云南公路局在滇缅公路的大修工程中曾挖掘出一段钢质波纹管的过水涵管,后被证实为二次大战时期从美国进口安装的。1998 年 9 月在上海浦东高桥地区挖掘出一段直径为 1m 的过水波纹管涵洞,经考证为 1948 年安装,用于当时的军事便道。建国后由于诸多因素,波纹管涵未能广泛得到推广应用,改革开放后,深圳及大同煤矿均进口成品波纹管用于涵洞工程;至 20 世纪 90 年代末我国才逐步开展公路钢波纹管涵洞的应用及研究、生产。

1997~1999 年,中交第一公路勘察设计院在青藏公路多年冻土地区成功地铺筑了 3 道金属波纹管涵洞(在 K3278+200 与 K3280+915 处为 2 道整体式、K3263+094 处为 1 道拼装式),解决了多年冻土地区因融沉和冻胀而导致涵洞破坏的难题。

大兴安岭加漠公路不良地质现象主要为多年冻土,部分为湿地,为解决大兴安岭多年冻土地区涵洞基础稳定性问题,决定采用波纹管涵洞,以适应因多年冻土退化而引起的变形和沉降,共修建钢波纹管涵洞 100 余道,孔径  $\Phi 1.0\text{m}$ ,镀锌板厚 1.0~2.5mm,波距 68mm,波高 13mm。使用 1 年后,对波纹管涵洞进行了全面调查,除极少部分因施工原因、基础处理不当、防水处理不当发生不均匀沉降变形,涵身有积水和渗水现象外,大部分波纹管涵洞使用状态良好,目前尚未发现因构造原因产生的损坏。

国道 214 线青康公路姜路岭清水河段,多年冻土与融区相间分布,冻土温度高,

属典型的退化性多年冻土。原有涵洞因冻胀和融沉反复作用或因基础埋置过浅导致涵洞铺砌破损、翼墙倾覆、涵台开裂、洞身裂缝、错台等破坏。为克服因冻融导致涵洞过早的破坏，2000 年试用 $\Phi 150\text{cm}$  的钢质镀锌波纹管，取得成功。2001~2002 年推广到西宁久治公路大武至久治段、花石峡至达日公路、二指哈拉山至尕海等公路建设中，至 2002 年四个公路项目已累计使用 418 道波纹管涵洞 8231.19m，直径从 150cm 至 250cm，涵洞顶填土高度由 100cm 增加到 1700cm，波纹管壁厚由 3mm 增加到 5mm。

1998~1999 年上海市在上海四号线、浦东国际机场中采用了钢质波纹板通道，板厚度为 2.5~12mm，呈圆弧形、拱形或椭圆形，可用作公路通道、涵洞等，有利于改善软土地基上结构物的沉降不均的问题。国内钢质波纹板通道涵洞的应用情况见表 1-1。

表 1-1 钢质波纹板通道涵洞的应用情况

时间	地点	道路名称	直径 (m)	顶长 (m)	底长 (m)	壁厚 mm	备注
1998 年 4 月	上海浦东张桥 工业区		4.46	10	18	6	圆形
1998 年 6 月	上海市四号线	莘朱公路新开河	4.0	38	50	6	圆形
1998 年 10 月	上海浦东	国际机场二期工程专用公路	4.0	19.2	31.30	5	圆形
2000 年	上海浦东	国际机场二期工程专用公路	4.0		32.5	5	圆形
2001 年 1 月	上海浦东	国际机场二期工程专用公路	3.5×4.8*		32.0	5	椭圆
2001 年 4 月	207 国道 湖北段	荆沙长江大桥南引道	3.5×5.3*		150	6	拱形
2001 年 10 月	上海	莘奉金高速公路	5.3		100	7	圆形
2002 年 3 月	湖北	洪湖市	3.45× 6.6*		23	6	拱形
2000 年 2 月	湖北荆州市	李铺镇	3.2×5.0*		8	6	拱形

注：\*为矢高×跨径，表中数据截止至 2002 年 8 月。

2004 年内蒙古、河北等地区也逐步开始应用钢质波纹管涵洞。

## 1.4 国内钢波纹管涵洞的生产

波纹管的制作方法有：机械胀型、液压成型、滚压成型、焊接成型和电沉积成型等。液压成型可以获得综合性能较好的波纹管；滚压成型可以用来制作大直径的波纹管；焊接成型可以获得弹性较好的波纹管；电沉积成型可以制作小直径和高精度的波纹管。

目前国内钢波纹管涵洞的生产厂家共 5 家，主要有液压成型、滚压成型两大类，至 2003 年 8 月，国内共生产钢波纹管涵洞约 550 道。各厂家生产工艺各有不同，在具体

工艺上同类之间也存在一定的差异,但选用材质基本为 Q235A 或 A3 钢板,波形除波纹板外基本为波距为 14cm,波高 7cm,个别生产企业根据直径和加工工艺对波高、波距适当进行了调整。

## 1.5 国内钢波纹管涵洞的研究

1997~1999 年,笔者在青藏公路第三期科研工作中针对波纹管涵洞初步开展了与圆管涵的力学性能进行的对比研究。研究表明:相同围压时,波纹管与普通圆管的径向最大位移相当,但波纹管的轴向位移明显大于普通圆管,表现出波纹管具有轴向补偿位移的功能;波纹管的内部应力拉、压相间,充分发挥了金属材料各向同性的优良特性,而普通圆管内部拉应力较小,压应力较大,故普通圆管一般采用混凝土材料为主。钢波纹管涵对地基扰动小,热阻小,对土层的热扰动小,不渗水,有利于保持多年冻土地区的水热平衡,保护冻土,从而达到了青藏公路涵洞工程整治的目的。

1998 年,上海市工程设计研究院和上海公路处在上海新开河针对 4m 直径的钢波纹板通道(涵洞)进行了荷载试验,结合试验采用有限元对波纹板结构进行了初步力学分析,其研究表明:最大拉应力和压应力均出现在上半圆两个  $45^\circ$  方向上,最大拉应力在波峰,最大压应力在波谷。

## 1.6 研究目的与意义

尽管国内生产及应用了大批量钢波纹管涵洞,但尚未开展其受力特征、防腐性能及设计方法和施工技术的系统研究。为加强波纹管涵洞的推广应用,改善我国公路工程涵洞结构形式,降低造价,需要开展专题研究以作为设计、施工的参照。

本文通过对钢波纹管涵洞应用技术的研究,结合我国材料及制造业的发展水平,研究单管钢波纹管涵洞的适用条件和受力特征,研究钢波纹管涵洞的管材强度及防腐技术,同时研究钢波纹管涵洞的施工工艺,为钢波纹管涵洞设计与施工提供依据及相关参考资料,以达到在公路工程中推广应用钢波纹管结构、提高钢波纹管涵洞的设计施工水平和工程质量、降低公路工程涵洞造价、提高经济效益的目的,同时为制定公路工程行业标准提供科学依据。

## 1.7 研究内容与技术路线

### 1.7.1 主要研究内容

本文主要研究内容为:

(1) 钢波纹管涵洞的力学性能研究;



(2) 钢波纹管涵洞的腐蚀机理及防腐技术研究;

(3) 公路钢波纹管涵洞的设计和施工技术。

### 1.7.2 研究的技术路线

从国内外钢波纹管涵洞的生产、材质、波形、防腐性能及应用情况的详细调查研究着手, 结合试验工程就钢波纹管涵洞的力学特征性能开展系统的试验研究和室内模拟研究, 计算分析不同荷载下, 不同管径、不同壁厚、不同波形的钢波纹管涵洞的受力状况, 总结受力规律, 进而确定钢波纹管涵洞的适用范围和条件, 并结合试验工程研究钢波纹管涵洞的施工工艺。

关于钢波纹管涵洞的力学性能分两部分进行研究, 即钢波纹管涵洞的野外试验和钢波纹管涵洞的室内计算模拟。其中野外试验主要研究施工过程中各种工况下管周土压力和管壁内侧、外侧切向、轴向应力应变规律, 采用钢弦式土压力计和 7V08—SUPER DATA LOGGER V9.0 数据采集系统进行测试; 模拟主要在精度分析的基础上研究钢波纹管涵洞在不同波形、不同壁厚、不同荷载、不同填土高度作用下的力学性能, 采用有限元法对钢波纹管涵洞的复杂受力状态进行系统分析。

通过调查相关行业建筑结构及埋地管道的腐蚀机理及防腐方法和措施; 调查研究美国和加拿大公路钢波纹管涵洞的腐蚀研究和防腐对策; 分析钢结构在土壤、水溶液和大气中的腐蚀规律和影响因素, 结合我国公路中钢结构的防腐措施, 提出适用于我国的钢波纹管涵洞防腐蚀推荐方案。

根据国内钢波纹管涵洞在公路和铁路上的施工经验和实践, 分析总结出适用于我国的钢波纹管涵洞施工技术, 其中包括施工工艺和技术要求及施工中的注意事项等关键技术。

## 第二章 钢波纹管涵洞的力学试验研究

研究目的：主要研究钢波纹管涵洞的力学特征；研究施工过程中填土及荷载对涵洞的影响，总结施工工艺（第七章）。

### 2.1 试验涵洞概况

试验涵洞为青藏铁路格尔木南山口~拉赤台段 DK856+262 和 DK857+973 波纹管涵，位于格尔木河左岸，地形平坦、开阔。设计路基顶宽 7.10m，边坡坡率 1: 1.5。两涵洞的地质情况均为：圆砾土，灰白色，厚度 7.5m，颗粒成分主要有砂岩、石英岩，局部夹有 0.1~0.3m 粗砂薄层。涵洞基础采用换填 1.0~1.2m 天然砂砾，最大粒径不超过 50mm，小于 0.074 的粉粘粒含量不超过 3%；进出口采用浆砌片石铺砌，波纹管材质为 Q235A 钢，内外壁采用无机富锌涂料防腐，厚度不小于 180 $\mu$ m，用法兰轴向相连。涵底 0.5~0.6m 范围内压实度要求达到 90%。涵管在进出口制作成与边坡相同坡率的斜口。

DK856+262 涵洞管顶覆盖 2.39m，内径 1.20m，涵长 18.48m；DK857+973 涵洞管顶覆盖 1.32m，内径 1.00m，涵长 14.82m；两涵波形：波高 7cm，波距 14cm，壁厚 4mm。

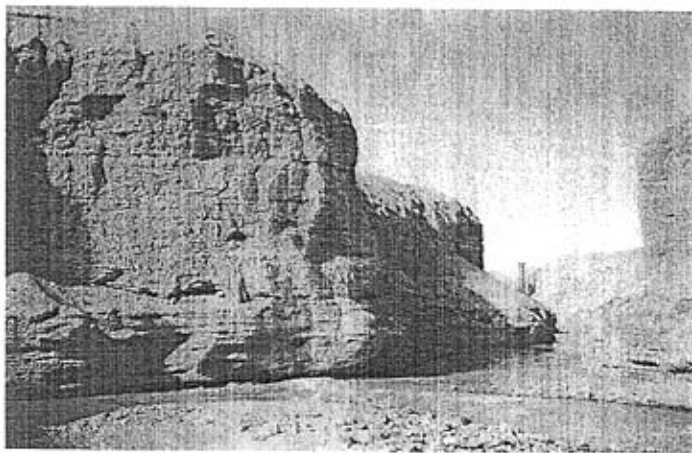


图 2-1 试验涵洞地质情况

## 2.2 力学试验方案、方法及测试内容

### 2.2.1 试验方案

采用 7V08-SUPER DATA LOGGER V9.0 数据采集系统和钢弦式土压力计，通过布设应变片和土压力计测定不同施工荷载下涵管的力学特征。

#### 2.2.1.1 测点应变片总体设置方案

涵洞设置三个测区，分别对应于路中、路肩和 1/2 边坡位置处，见测区示意图(图 2-2)，测区编号分别为 1、2、3。每个测区设置 9 个测试断面，分别设置于波顶、1/2 波面和波谷处内侧，详见断面示意图，断面编号分别为 1、2、3、4、5、6、7、8、9。每个断面设置 10 个测点，分别设置于管顶、上下部 1/4、上下部 1/8、上下部 3/8、上下部 1/2 和管底内侧，详见测点示意图，测点编号分别为 1~10，应变片的编号按照测区—断面—测点进行编号。

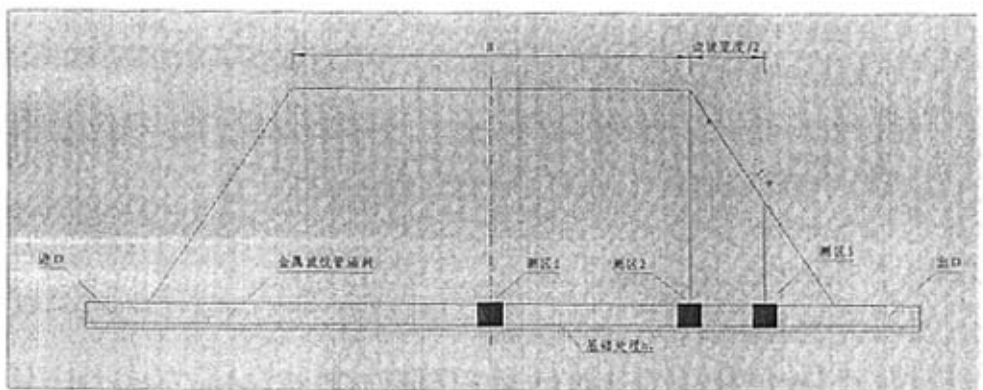


图 2-2 波纹管测区示意图

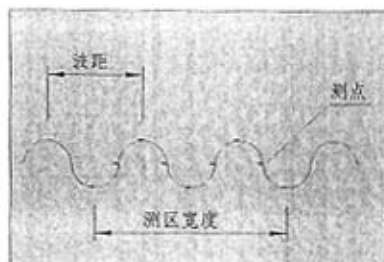


图 2-3 波纹管测试断面示意图

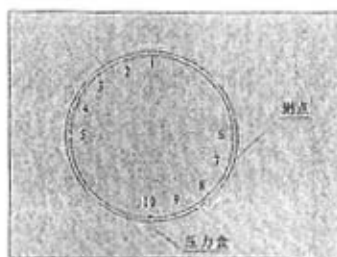


图 2-4 波纹管测点示意图

为采集相关轴向受力和变形特征，分别在管顶、管中处内侧设置沿轴向应变片。为测试管外侧切向、轴向受力和变形特征，分别在管顶、管中处外侧设置沿切向、轴向贴置的应变片。

#### 2.2.1.1.1 DK856+262 涵洞应变片设置

### 1. 内侧应变片

DK856+262 涵洞测区 1、2、3 断面见图 2-5，每个测区共设置 9 个断面，每个断

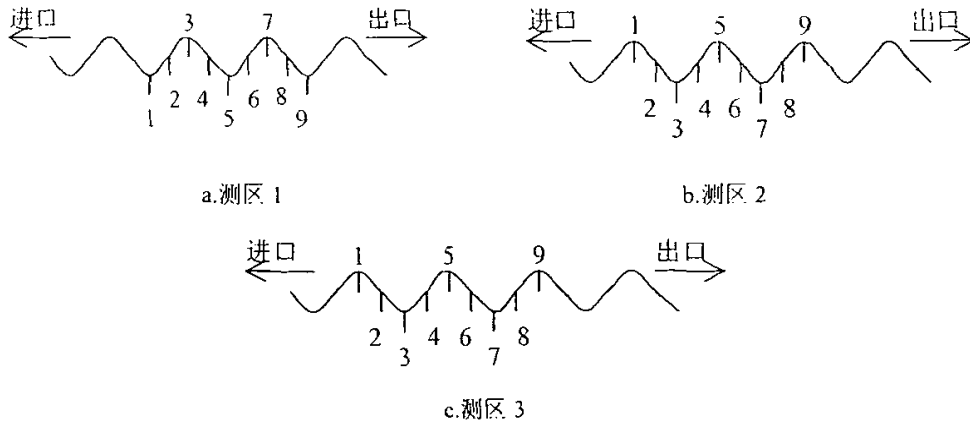


图 2-5 DK856+262 涵洞测区 1、2、3 各断面

面 10 个测点（图 2-4），内侧切向测点共 270 个，采用 BE120-3AA 型电阻应变计。

轴向应变片分别贴在测区 1 断面 3、4、5、6、7 的测点 1 和测点 5，在测点 1 位置编号分别为 1-3~7-11，在测点 5 位置分别为 1-3~7-12，共 10 个测点。轴向贴应变片采用 BE120-3BC 型电阻应变计，呈“十”字应变花。

### 2. 外侧应变片

外侧应变片分别贴在测区 1 断面 5、6、7 对应于测点 1 的外侧，设置切向和轴向应变片，采用 BE120-3AA 型电阻应变计，共 6 个测点，编号分别为：切向 1-5~7-13，轴向 1-5~7-14。在测区 1 断面 5、7 对应于测点 5 位置的外侧，设置切向和轴向应变片，采用 BE120-3AA 型电阻应变计，共 4 个测点，编号分别为：切向 1-5-15 和 1-7-15，轴向 1-5-16 和 1-7-16。

## 2.2.1.1.2 DK857+973 涵洞应变片设置

### 1. 内侧应变片

DK857+973 涵洞测区 1、2、3 的断面见图 2-6，每个测区共设置 9 个断面，每个断面 10 个测点，内侧切向共 270 个测点，采用 BE120-3AA 型电阻应变计。

轴向应变片分别贴在测区 1 断面 3、4、5、7、9 的测点 1，在测点 1 位置编号分别为 1-3~7-11，在测点 5 位置分别为 1-3~7-12，共 10 个测点。轴向贴应变片采用 BE120-3BC 型电阻应变计，呈“十”字应变花。

### 2. 外侧应变片

外侧应变片分别贴在测区 1 断面 3、4、5 对应于测点 1 的外侧，设置切向和轴向应变片，采用 BE120-3AA 型电阻应变计，共 6 个测点，编号分别为：切向 1-3~5-13，

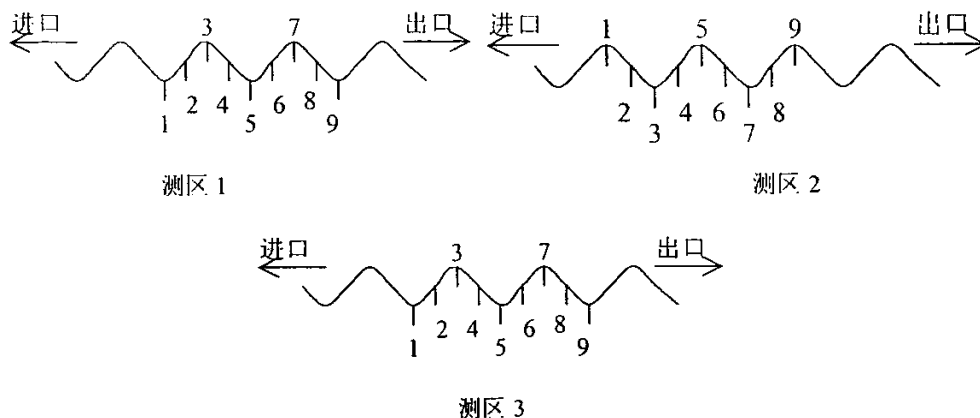


图 2-6 DK857+973 涵洞测区 1、2、3 各断面

轴向 1-3~5-14。在测区 1 断面 3、5 对应于测点 5 位置的外侧，设置切向和轴向应变片，采用 BE120-3AA 型电阻应变计，共 4 个测点，编号分别为：切向 1-3-15 和 1-5-15，轴向 1-3-16 和 1-5-16。

### 2.2.1.2 压力计设置

设置三个测区同上，对测区 1、2、3 分别在断面 1 和断面 9 位置处，在涵管底部、下部 1/4 处、中部、上部 1/4 及涵顶（分别对应测点 1、3、5 或 6、8、10）位置外侧设置压力计。其中，DK856+262 涵洞测区 3 压力计设置于 1、3、5、6、10 测点位置。压力计的表面与管相切，压力计与管之间及压力计外侧 5cm 内采用细颗粒土填充，以避免受力不均匀影响测试结果。

## 2.2.2 试验步骤

### 2.2.2.1 测试准备工作

压力测试前，先在不受力情况下，将压力计置于涵管位置测试其初读数。

在应变片测试前的准备工作主要有以下内容：

(1) 准备应变片、胶粘剂及其它辅助材料及相关工具，准备好应变测量的仪器及测试用线，将测试用线检查、编号、端头剥线、涂焊锡；

(2) 现场选点并做标志、打磨、刨光、清洗、定点、贴应变片和端子、焊接应变片和端子、涂漆绝缘、检查电路、封胶。

(3) 测试前，将编好号的测试用线与端子焊接好，并再次检查电路，将接线的另

一端与检测仪器的接线箱连接，并做好接线编号、应变片编号与通道号的对应关系。

(4) 接好温度补偿片，确保温度补偿片与测试元件处于相同温度条件。



图 2-7 定点后的打磨



图 2-8 砂纸磨平

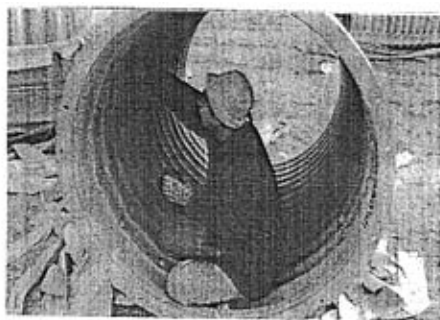


图 2-9 清洗



图 2-10 粘贴端子

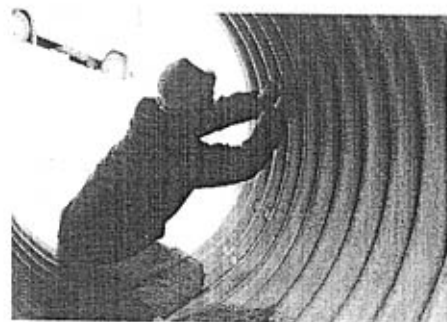


图 2-11 粘贴应变片

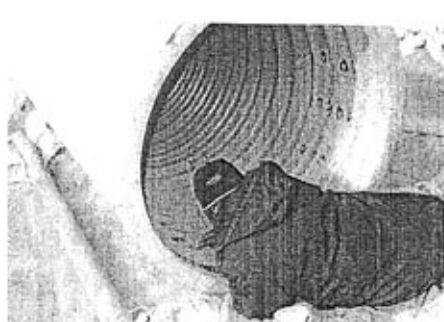


图 2-12 绝缘

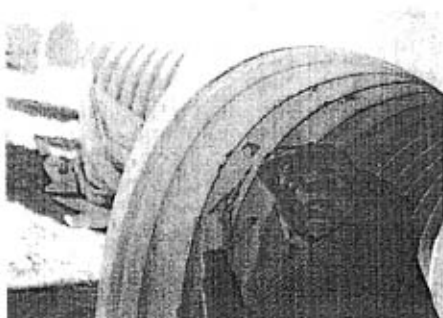


图 2-13 焊接端子与应变片

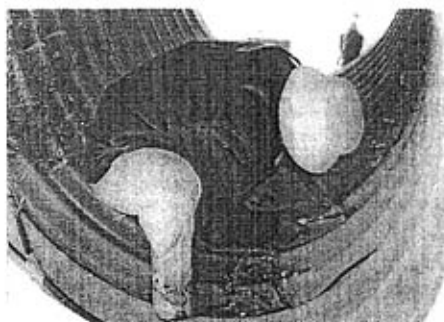


图 2-14 焊接电线



图 2-15 检查接线



图 2-16 接线箱的连接



图 2-17 连接测试仪测试

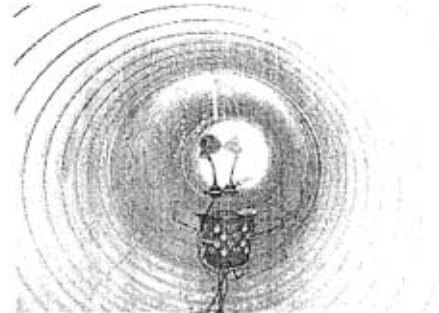


图 2-18 挠度与应变测试

### 2.2.2.2 测试步骤

应变测试主要步骤为：

- (1) 启动发电机，接通仪器电源，启动仪器，进入主界面；
- (2) 初始化，检查应变片的连接情况并确保连接正常；
- (3) 测试初始值；
- (4) 填土或用汽车、压路机等加荷；
- (5) 测试各荷载工况下的应变，保存/打印数据。

压力测试步骤为：压力盒编号——标定——测试初读数——埋置压力盒——各工况测试。

挠度测试主要用水准仪测量测区 1 管顶波峰在活载作用下的变形。

应变及压力测试完成后，将所有外接线放置在事先准备的铁箱中予以保护。

2001 年 10 月~11 月结合青藏铁路波纹管涵洞的施工进行了测试，2003 年 7 月又进行了补充测试，测试过程中通过填土、压路机、推土机、汽车、火车机头等加荷方式加载。测试的工况如下。

#### A、DK856+262 涵洞测试过程及工况

工况 1：在涵管两侧及顶部填土（含土砂砾）至管顶以上 0.3m 且压实后的状态。

工况 2：填土至管顶以上 0.3m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮（轮重 15 吨，宽 2.1m）置于路基中心位置，压路机的后轮置于进口方向。

工况 3：填土至管顶以上 0.3m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮置于路基测区 2 位置，压路机的后轮置于进口方向。卸载压路机后再次测试应变，作为工况 3-2。

工况 4：填土至管顶以上 1.8m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮置于路基中心位置，压路机的后轮置于进口方向。

工况 5：填土至管顶以上 1.8m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮置于路基测区 2 位置，压路机的后轮置于进口方向。

工况 6：填土至管顶以上 1.8m 且压实后，无活载作用。

#### B、DK857+973 涵洞测试过程及工况

工况 1：裸管状态为工况 1-1。当管北侧（格尔木方向）填虚土至管直径 3/4 时为工况 1-2。填虚土至管顶以上 0.3m 后为工况 1-3。填土至管顶以上 0.3m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮置于路基中心测区 1 位置，压路机后轮置于进口方向为工况 1-4。

工况 2：填土至管顶以上 0.3m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮置于路基测区 2 位置，压路机的后轮置于进口方向。

工况 3：填土至管顶以上 0.3m 且压实后，沿管轴向将压路机光轮置于路基中心位置，压路机的后轮置于进口方向。

工况 4：填土至管顶以上 0.3m 且压实后，无活载作用。

工况 5：填土至管顶以上 0.3m 且压实后，将装载有货物总重 29.8 吨的天马自卸货车沿路线前进方向停放，后轮（双轮组、双轴）一轮作用在路基中心，另一轮在进口方向，为工况 5-1。沿路线前进方向停放天马自卸货车，将后轮（双轮组、双轴）一轮



作用在管路基中心偏东 0.5m，另一轮在进口方向为工况 5-2。其中天马自卸货车为重庆西南车辆制造总厂生产，前轴与后轮前轴间距 3.0m，后轮的前轴与后轴间距 1.4m，后轮横向间距 1.8m，自重 12.49 吨。

工况 6：填土至路基标高（含底渣，虚土，涵顶填土 1.3m），沿路线前进方向，将推土机中心置于测区 1 位置。推土机为河北宣化工程机械有限公司生产的 T140-1 型，履带长 3.0m，宽 0.5m，履带间距（中心—中心）1.9m，总重 17 吨。

工况 7：填土至路基标高（含底渣，虚土），无活载作用。

## 2.3 钢波纹管涵洞的力学试验结果分析

### 2.3.1 径向土压力

各工况下 DK856+262 涵洞土压力计算结果如表 2-1。

表 2-1 DK856+262 涵洞土压力计算结果

测区	测点	各工况下土压力 (KPa, $\phi 110\text{mm}$ 压力计)						
		管身荷载	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
1	1		5.80	6.54	7.67	38.26	33.73	31.23
1	3		11.46	14.63	16.52	46.40	39.30	34.59
1	5		7.56	18.10	6.10	14.11	14.89	12.02
1	8		1.02	1.83	1.02	3.92	7.03	2.73
1	10	2.3	107.80	112.92	121.61	171.29	169.90	167.97
2	1		5.91	7.68	51.73	39.49	41.26	39.59
2	3		20.97	12.87	14.35	33.92	33.86	34.74
2	5		0.63	1.53	8.48	5.16	6.08	5.34
2	8		1.55	2.46	3.56	4.10	5.04	4.10
2	10		111.52	134.10	123.59	176.31	179.32	175.46
3	1		6.56	6.29	6.55	22.21	16.74	22.36
3	3		7.49	7.28	7.98	17.49	11.55	17.71
3	5		3.50	4.22	4.62	9.36	9.56	9.42
3	6		3.83	3.72	3.62	9.01	9.12	9.56
3	10	2.2	54.03	61.56	67.66	118.75	118.95	119.35

图 2-19 为 DK857+973 涵洞在测区 1、测区 2 和测区 3 的工况与压力关系图。

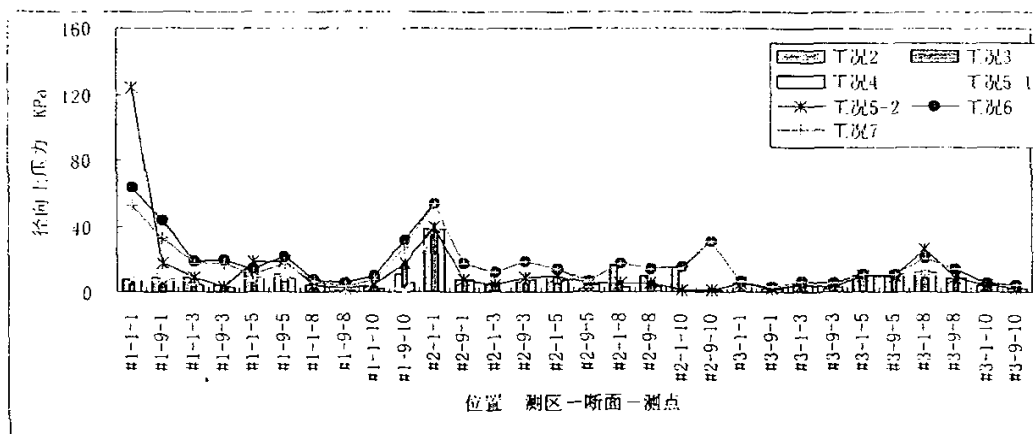


图 2-19 不同工况下各测点径向土压力

从表 2-1 和图 2-19 可看出关于波纹管涵洞的径向正压力有以下结论:

- (1) 各工况下, 管底测点 10 处的土压力最大, 测点 8 处土压力最小;
- (2) 管侧测点 5 处的土压力, 与测点 6 处基本相当, 说明涵管的受力分布对称于过圆心的垂线;
- (3) DK856+262 涵洞在管顶填土 0.3m (工况 2) 时, 16 吨压路机 (净重 15 吨) 直接碾压, 最大压力均小于管顶填土 1.8m 压路机碾压的结果;
- (4) 管身荷载对径向土压力影响不大;
- (5) DK856+262 涵洞管顶填土 1.8m 时压路机荷载作用和 DK857+973 涵洞管顶填土 1.3m 时推土机荷载对管周土压力影响较小。
- (6) 填土 0.3m 作用汽车荷载时, 局部土压力较大, DK857+973 涵洞压力最大可达到 123.89KPa, 比压路机、填土 1.3m 及推土机均布荷载导致的土压力大, 表明填土 0.3m 时汽车荷载控制设计, 说明国外相关资料要求波纹管涵顶最小填土 0.3m 是合理的。

如果将测点 1 位置作为坐标原点; X 坐标垂直向下, 同时将测点位置标号 6~10 按照 1~5 侧与其对应位置编号修改为 5'~9', 如图 2-20 所示, 并将土压力作为 Y 坐标, 绘制成图 2-21 可看出各工况下土压力与测点位置 (垂直方向) 有呈三次多项式的变化趋势; 但趋势图中的拉应力并不存在, 实际上为压应力, 且大小接近于 0。

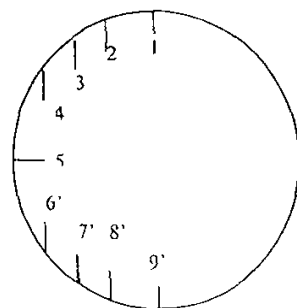


图 2-20 测点对应修改示意图

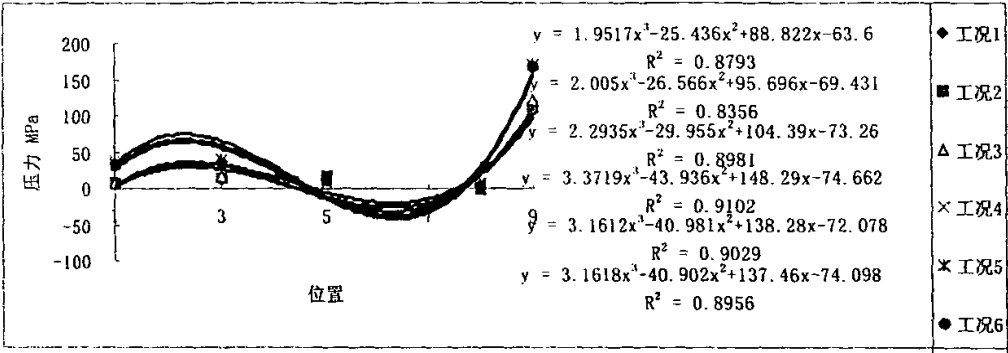


图 2-21 DK856+262 涵洞测区 1 各工况下土压力与位置的关系

2.3.2 内侧切向应变、应力

图 2-22~图 2-29 为 DK856+262 涵洞测区 1 各测试断面 1 不同工况下相对于工况 1、各测点内侧切向应变增量与测点的对应关系图。测区 1 断面 1、5、9 为波谷，断面 3、7 为波峰。

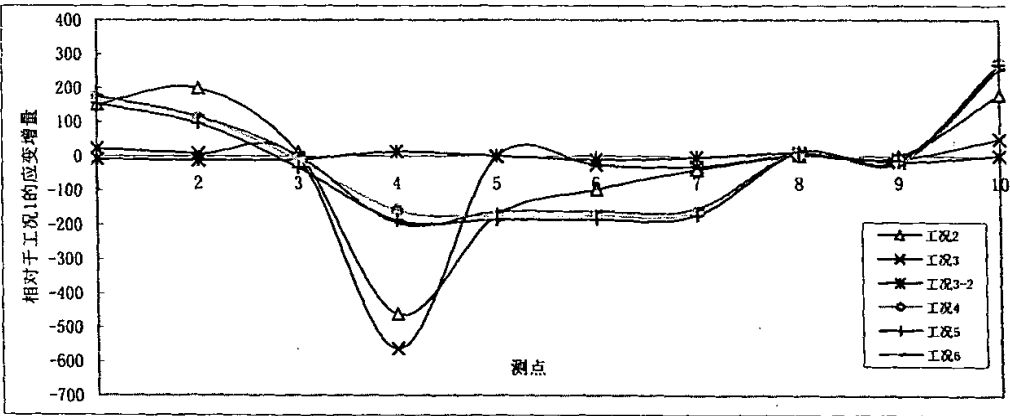


图 2-22 测区 1 断面 1 各测点的内侧切向应变

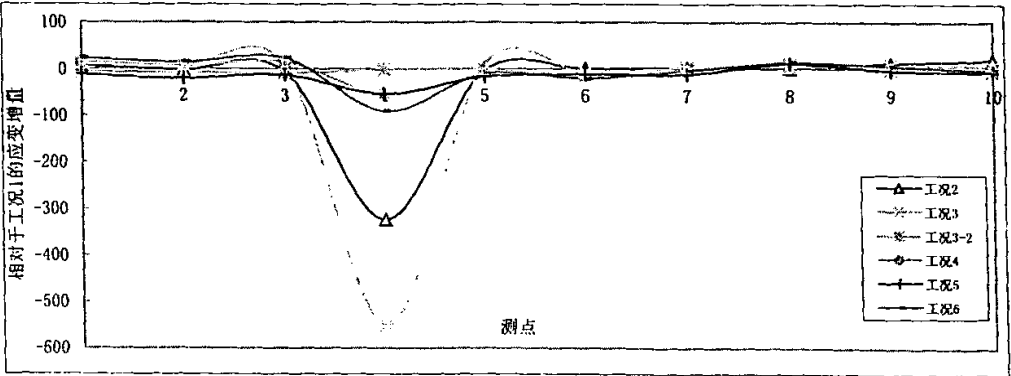


图 2-23 测区 1 断面 2 各测点的内侧切向应变

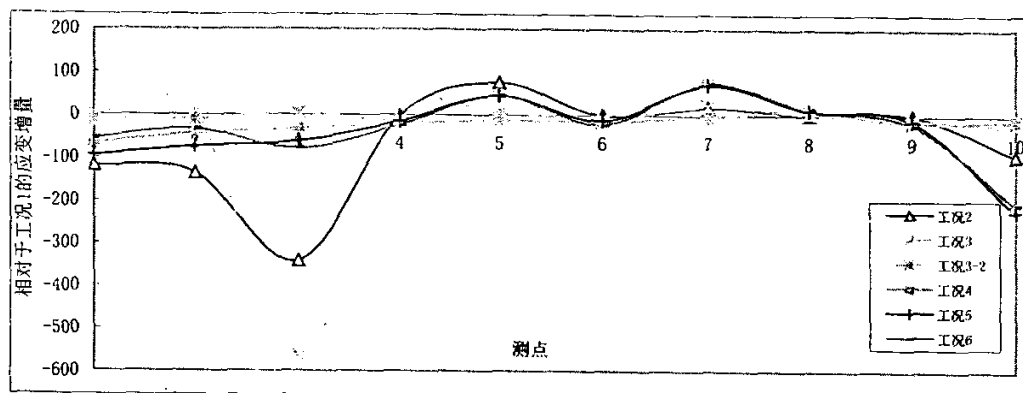


图 2-24 测区 1 断面 3 各测点的内侧切向应变

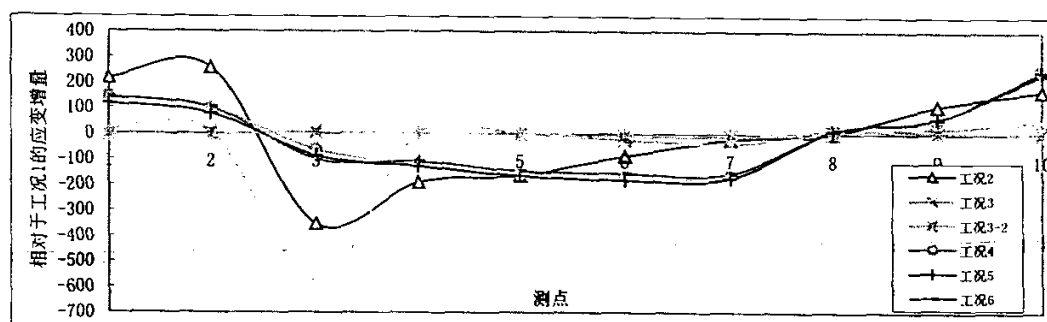


图 2-25 测区 1 断面 5 各测点的内侧切向应变

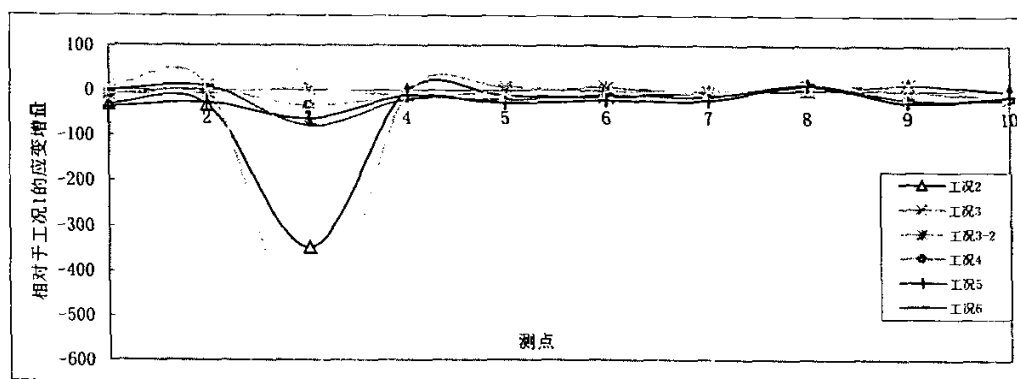


图 2-26 测区 1 断面 6 各测点的内侧切向应变

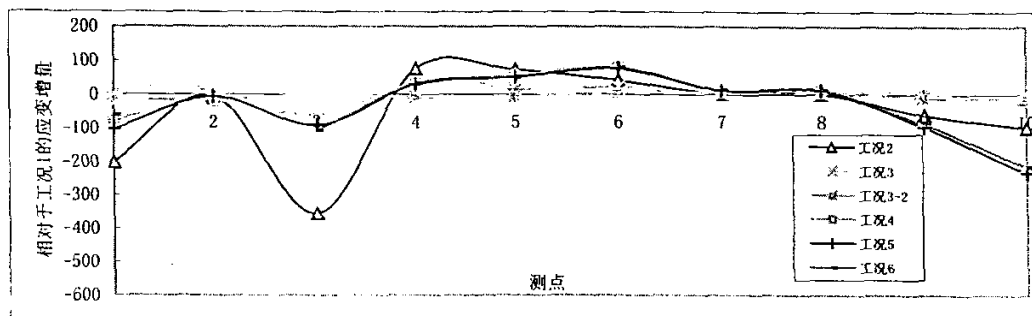


图 2-27 测区 1 断面 7 各测点的内侧切向应变

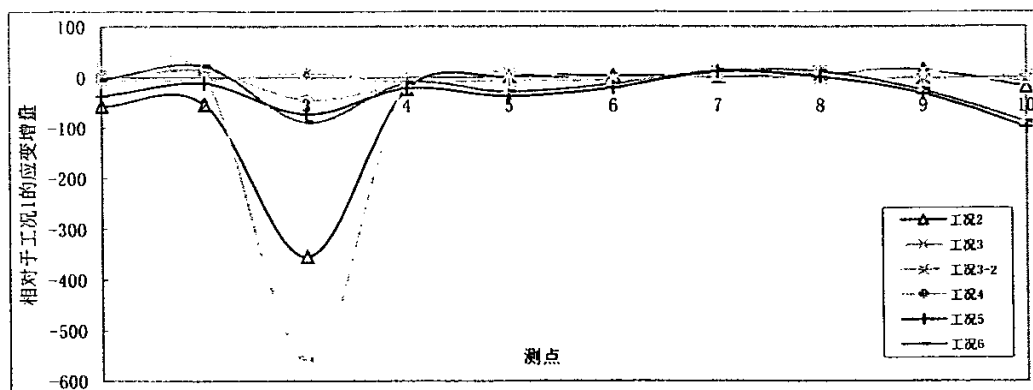


图 2-28 测区 1 断面 8 各测点的内侧切向应变

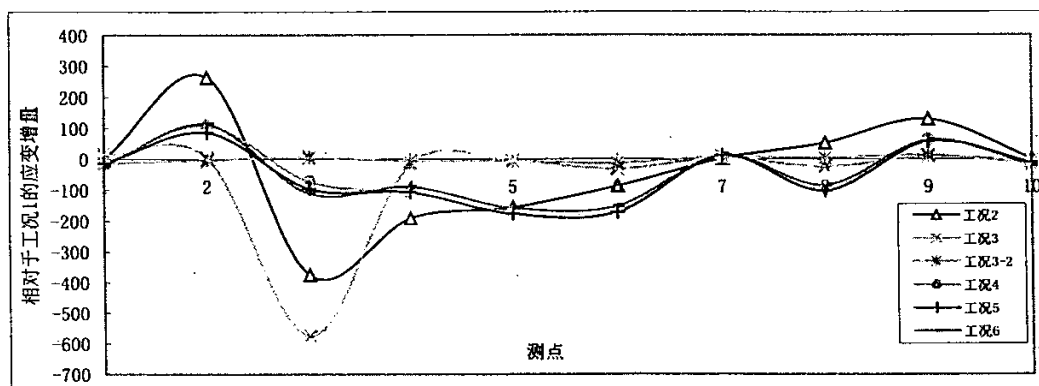


图 2-29 测区 1 断面 9 各测点的内侧切向应变

从图 2-22~图 2-29 中可得出:

DK856+262 涵洞相对于工况 1, 工况 2 和工况 3, 即管顶填土高度 0.3m 将压路机沿管轴向分别作用于路基中心测区 1 和路肩测区 2 位置时, 测区 1 各断面在测点 3~4 处的切向应变较其它测点大, 这与上海市政工程设计研究院研究结果:“最大拉应力和压应力均出现在上半圆两个  $45^\circ$  方向上, 最大拉应力在波峰, 最大压应力在波谷”在一定程度上相似, 即在工况 2 和工况 3 下各断面的切向最大应变在上半圆两个  $45^\circ$  方向附近, 但并非最大拉应力和压应力均出现在上半圆两个  $45^\circ$  方向上; 其它工况下也并非切向最大应变在上半圆两个  $45^\circ$  方向附近。

图 2-30~图 2-36 为两涵洞不同测区不同测点关于内侧切向应力随波形(断面)的关系, DK856+262 涵洞相对于工况 1, DK857+973 涵洞相对于工况 1-1。从图中可得出:

(1) 在不同工况下各测点在不同测试断面的内侧切向应力均有随波形呈周期变化

的规律。测点 1~3、测点 8~10 等管顶和管底局部位置，波谷呈现一定的拉应力，而波峰则呈现一定的压应力；侧峰的应力应变接近 0。测点 5（管侧）位置波峰呈现一定的拉应力，而波谷则呈现一定的压应力。各测点侧峰的应力增量均小于波峰和波谷的幅度。

(2) 波峰和波谷各测点在压路机或汽车荷载作用下，均出现一定的应力应变集中的现象，尤其时管顶填土 0.3m 时汽车荷载作用下波峰和波谷存在明显的应力应变集中，DK857+973 涵洞测点 1 波峰最大压应变达  $571 \mu\epsilon$ 、波谷拉应变最大达  $402 \mu\epsilon$ ，此时的应力可作为主要因素控制涵洞施工设计；

(3) 在施工过程中，路基填土高度至管顶上 0.3m 时压路机静荷载作用下，钢波纹管结构在局部位置呈现较大的应力，有的甚至大于管顶上填土从 0.3m 增加至 1.8m（或 1.3m）土压力作用下的应力增量，但其应力增量均未达到钢板材的屈服强度 245Mpa，满足施工过程的强度要求。

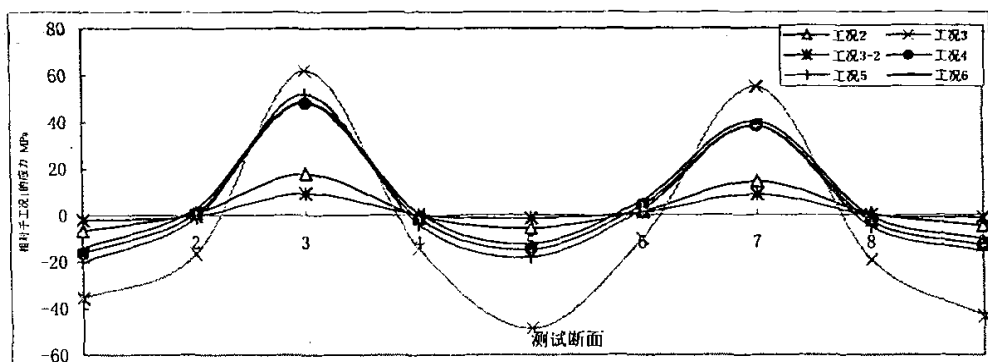


图 2-30 DK856+262 测区 2 不同工况下测点 1 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波峰，断面 3、7 为波谷)

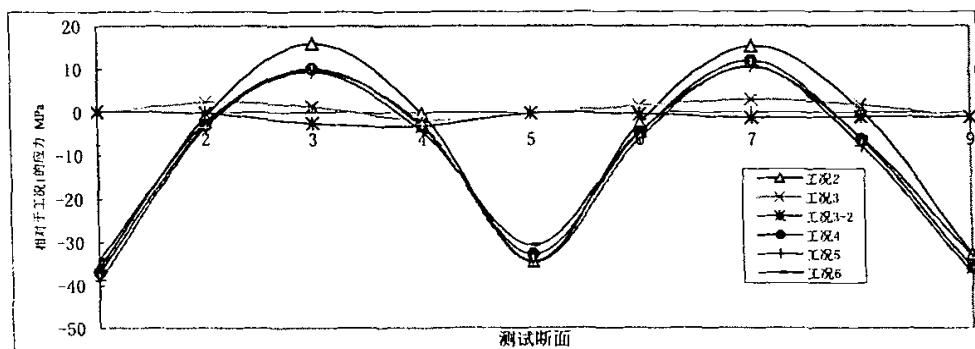


图 2-31 DK856+262 测区 1 不同工况下测点 5 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波谷，断面 3、7 为波峰)

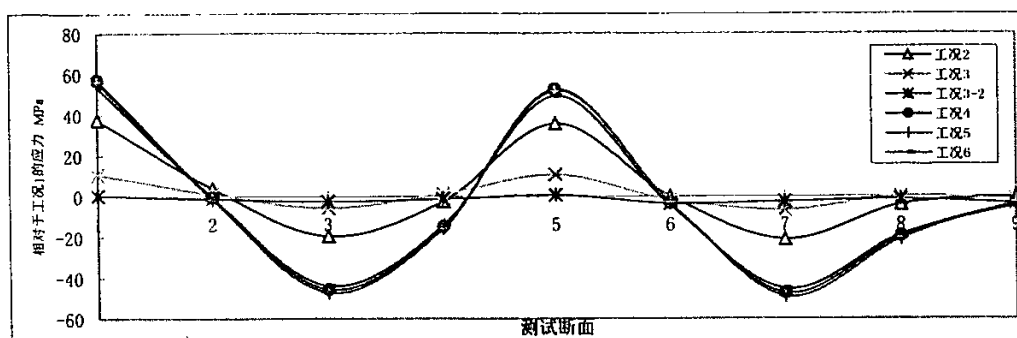


图 2-32 DK856+262 测区 1 不同工况下测点 10 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波谷, 断面 3、7 为波峰)

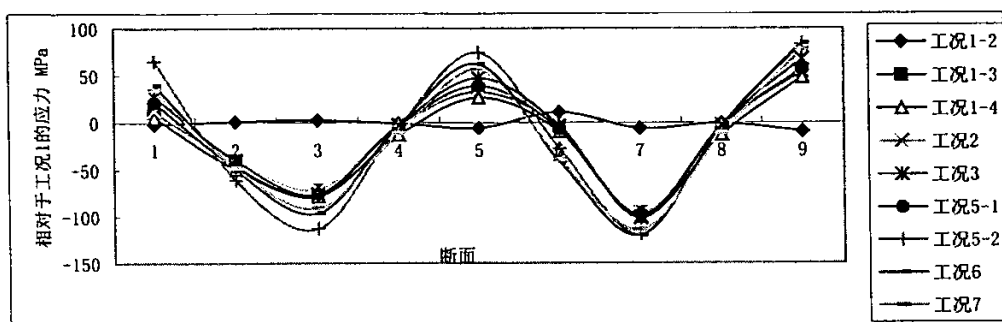


图 2-33 DK857+973 测区 1 测点 1 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波谷, 断面 3、7 为波峰)

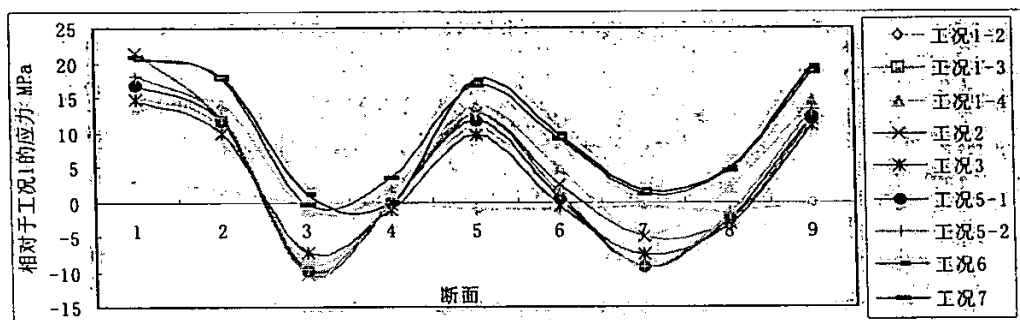


图 2-34 DK857+973 测区 2 测点 3 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波峰, 断面 3、7 为波谷)

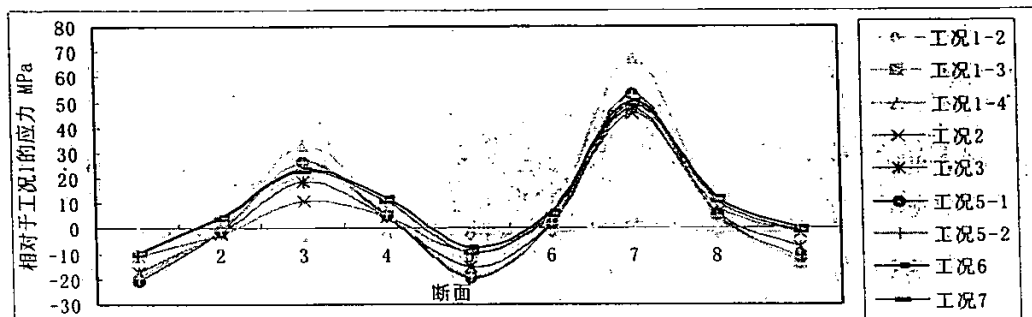


图 2-35 DK857+973 测区 2 测点 5 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波峰, 断面 3、7 为波谷)

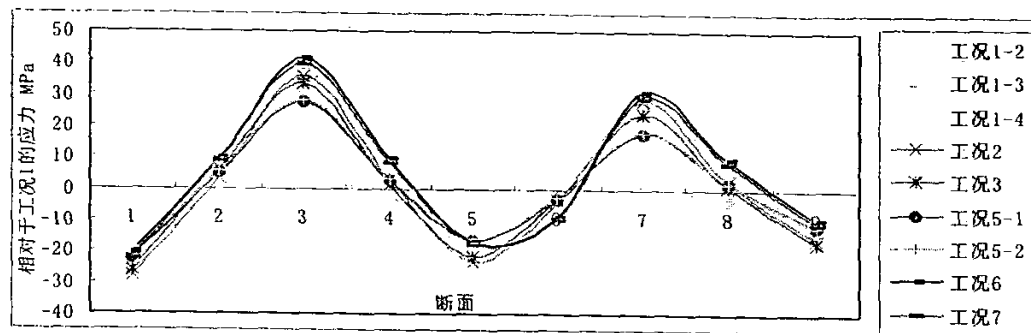


图 2-36 DK857+973 测区 2 测点 8 波形与内侧切向应力

(断面 1、5、9 为波峰, 断面 3、7 为波谷)

测区 3 由于距离路基中心较远且其位置处于边坡中心, 随荷载变化各工况的内侧切向应变略有起伏, 但变化幅度相对于测区 1 和测区 2 较小, 说明测区 3 不控制设计, 由于篇幅限制具体数据和图表未附。

图 2-37、图 2-38 为 DK857+973 涵洞测区 2 波峰和波谷的内侧切向应力与测点的关系图, 从图中可看出: 各工况下, 测区 2 与测区 1 (前文) 内侧切向应力与测点的关系不同; 测区 2 波峰内侧切向应变随着由管顶向管底的递进, 有逐渐由拉应力变为压应力的趋势, 管顶 (测点 1~3) 为拉应力, 管底部 (测点 7~9) 为压应力, 但管底测点 10 应力接近 0; 波谷, 应变随着由管顶向管底的递进, 有逐渐由压应力变为拉应力的趋势, 管顶 (测点 1~3) 基本为压应力, 管底部 (测点 7~9) 为拉应力, 管底测点 10 应变接近 0, 说明管底的应力并非为最大值, 最大应力基本在管顶 (测点 1~3) 和管底部 (测点 7~9)。

从图中可看出, 工况 1-2 为单侧填土至管直径 3/4 高度时的状况, 其内侧切向应力与裸管相差不大, 说明单侧填土对管内部应力影响不大。

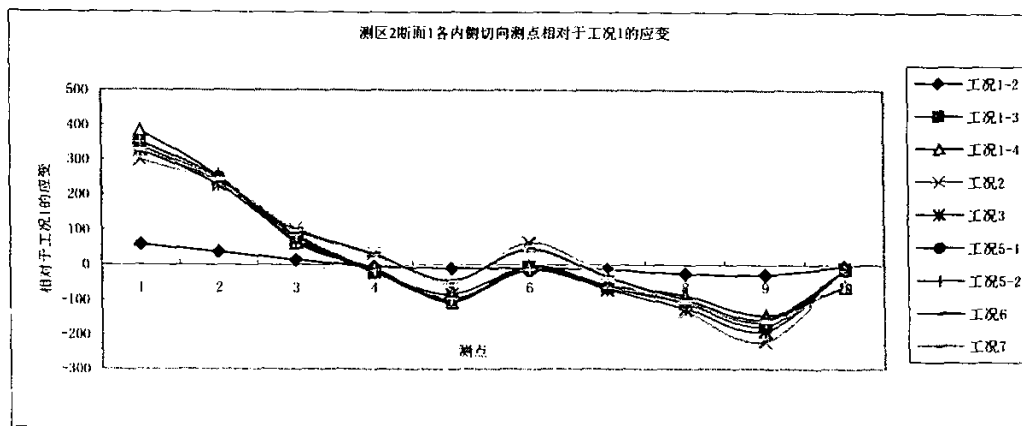


图 2-37 DK857+973 涵洞测区 2 断面 1 (波峰) 各测点内侧切向应变



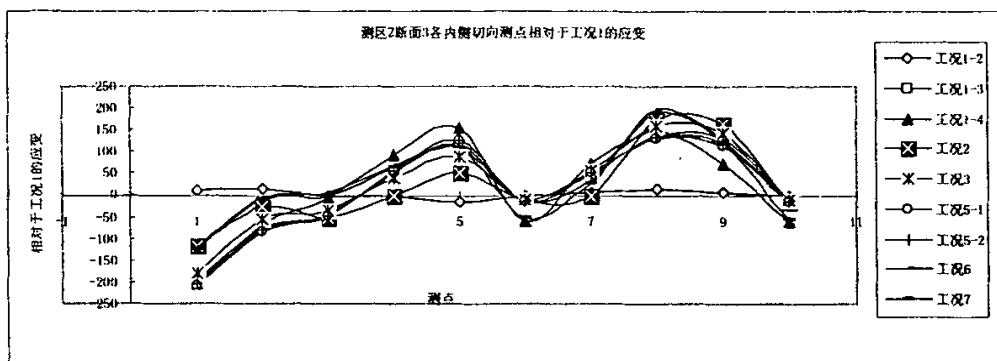


图 2-38 DK857+973 涵洞测区 2 断面 3 (波谷) 各测点内侧切向应变

### 2.3.3 钢波纹管涵洞的内侧轴向应力

图 2-39 为 DK856+262 涵洞测区 1 管顶测点 1 和管侧测点 5 内侧轴向应力，图 2-40 和图 2-41 分别为 DK857+973 涵洞测区 1 管顶测点 1 和管侧（指测点 5，下同）相对于工况 1 的内侧切向应力和轴向应力对比。

从图中可看出：

- (1) 管顶内侧轴向应力表现为波峰拉应力、波谷压应力的规律。
- (2) 管侧内侧切向应力和内侧轴向应力在波峰和波谷呈交替变化规律；波峰切向应力多为拉应力，而轴向应力为拉应力；波谷轴向应力为拉应力，而切向应力为压应力；侧峰切向应力、轴向应力均接近 0。

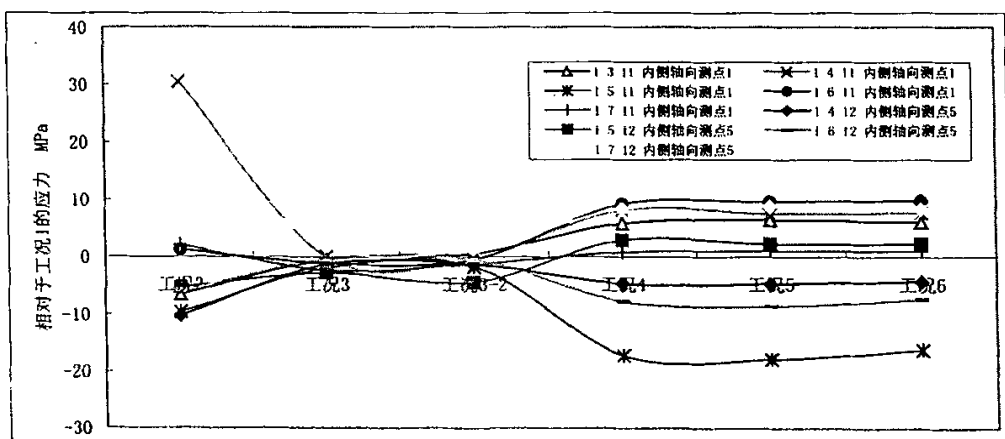
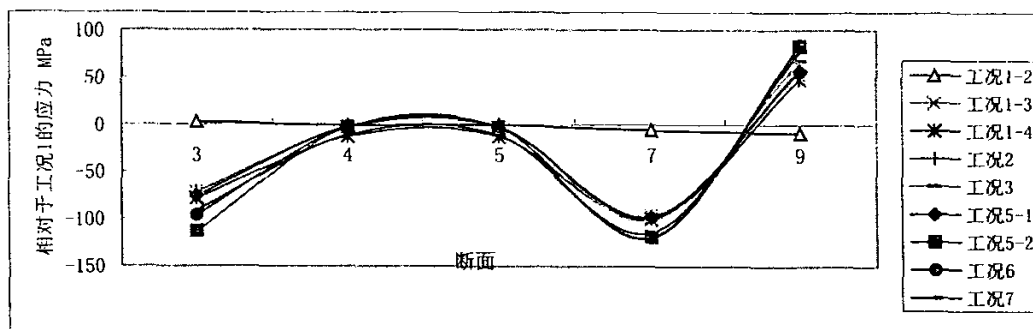
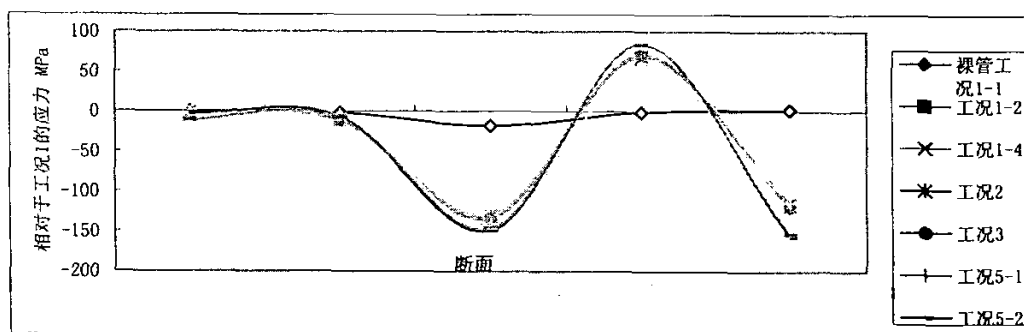


图 2-39 DK856+262 涵洞测区 1 测点 1 和测点 5 内侧轴向应力  
(断面 3、7 为波峰，断面 1、5、9 为波谷)

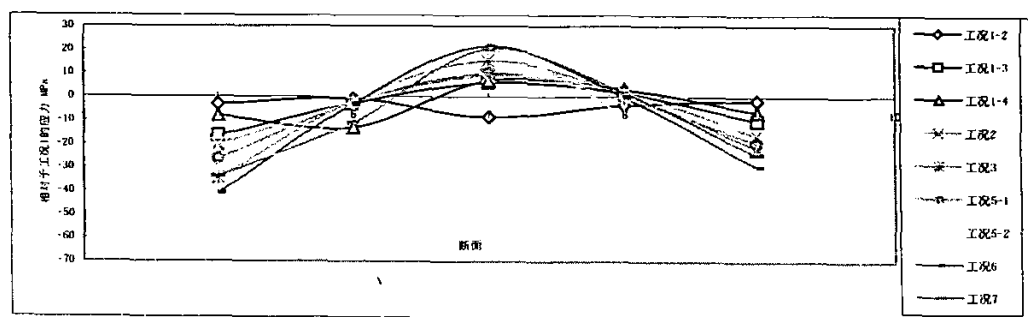


a 内侧切向应力 (断面 3、7 为波峰, 断面 1、5、9 为波谷)

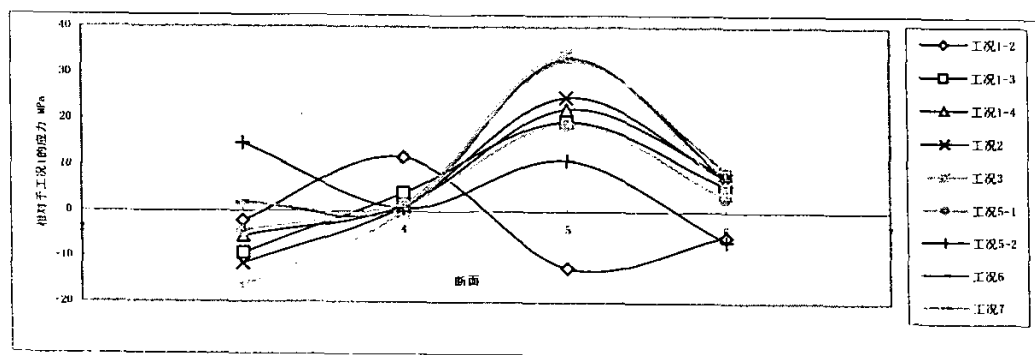


b 内侧轴向应力 (断面 3、7 为波峰, 断面 1、5、9 为波谷)

图 2-40 DK857+973 涵洞测区 1 测点 1 的内侧应力



a 内侧切向应力 (断面 3、7 为波峰, 断面 1、5、9 为波谷)



b 内侧轴向应力 (断面 3、7 为波峰, 断面 1、5、9 为波谷)

图 2-41 测区 1 测点 5 相对于工况 1 的内侧应力

### 2.3.4 钢波纹管涵洞的外侧切向应力、轴向应力

如图 2-42 所示, DK856+262 涵洞管顶测点 1 外侧切向应力在波谷处基本为拉应力, 外侧轴向应力在波谷处也基本为拉应力 (填土 0.3m 压路机直接碾压时外侧轴向为压应力除外); 管侧外测点 5 侧切向应力在波谷处基本为压应力; 管侧外侧轴向应力在波谷处也基本为压应力 (填土 0.3m 压路机直接碾压时外侧轴向为压应力除外)。

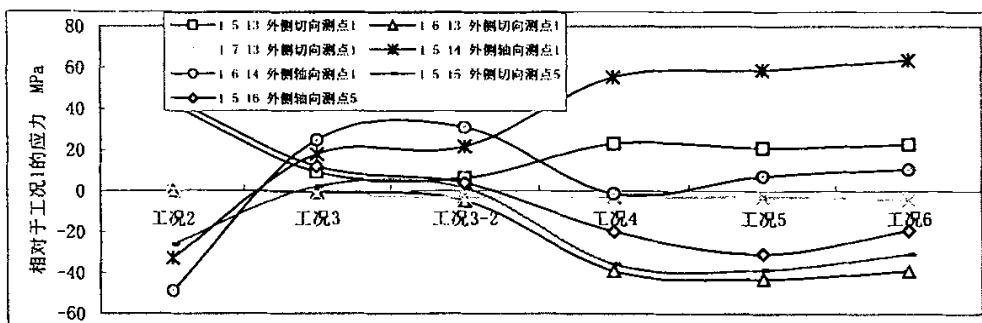


图 2-42 DK856+262 测区 1 测点 1 和测点 5 外侧切向和轴向应力  
(断面 3、7 为波峰, 断面 1、5、9 为波谷)

## 2.4 波纹管力学性能的影响因素分析

由于波纹管在加工过程中存在一定的偏差和初应力, 将对波纹管力学性能产生较大的影响, 表现在理论计算与实验结果的误差。

### 2.4.1 冷作硬化的影响

波纹管的成型前后, 表面积发生了变化, 其波峰和波谷处因冷挤压而产生加工硬化现象, 它可以提高材料的疲劳极限。但波纹管在制造过程中是两向拉伸的, 预拉伸同时降低了材料的延性。

### 2.4.2 应变集中和尺寸, 形状误差

由于波纹管在制造过程中的壁厚减薄, 实际壁厚与名义壁厚有所差异, 名义波形与实际波形也存在较大差别, 这样使波纹管由于尺寸和形状不均匀而容易发生应力重分布现象。

### 2.4.3 测试过程的影响

钢波纹管涵洞采用应变片和压力计进行测量, 一方面, 测量元件本身存在系统误差以及标定误差等影响因素, 另一方面测量过程中的温度变化对测试仪器和测试元件灵敏度均有影响, 此外由于应变片在管内外布设, 必然存在个别应变片和波纹管壁没有紧密接触、应变片所贴的实际位置和标称位置不一致, 这些因素的存在均会使得现

场实测值不能真实反映实测值。

## 2.5 本章小结

通过试验研究分析，发现了在施工过程中钢波纹管涵洞的如下受力特征规律：

(1) 钢波纹管涵洞的管周径向土压力随深度向下有呈三次多项式的变化趋势；管底的径向土压力最大，而管下部 1/4 处最小。

(2) 单侧填土对管内部应力影响不大；当填土高度为 0.3m 时，存在较大的应力集中。

(3) 路中各测点的内侧切向、轴向应力随波形呈周期变化的规律；波峰和波谷处管顶与管侧呈相反的拉压交替规律；在管上侧 1/2 附近存在切向最大应力；管侧波峰和波谷表现出内侧切向和轴向应力呈相反的拉压交替规律。路肩各测点由管顶向管底的递进，内侧切向应力在波峰由拉变压，波谷由压变拉，最大应力应变在管顶和管底部（测点 7~9）。

(4) 波谷处外侧切向、轴向应力在管顶为拉应力，管侧为压应力。

## 第三章 钢波纹管结构的力学性能研究

### 3.1 薄壳及旋转对称壳

波纹管是一种带波纹的圆柱形薄壁弹性壳体，可用薄壳理论分析研究。壳体理论假设：(1) 壳体是均匀、连续的且各向同性；(2) 壳体是线弹性的；(3) 壳体的变形是微小的；(4) 壳体变形前垂直于中轴面的法线段在变形后仍为长度不变的直线，并仍垂直于变形后的中轴面；(5) 假设法向应力很小，远小于其它应力分量，可忽略不计；(6) 中轴面上所有点在变形时不会在中轴面内移动。

对于组成波纹管涵的钢材料，只要外力不超过一定的限度，上述假设基本满足。

#### 3.1.1 旋转对称壳

旋转壳是以某平面曲线绕该平面内一给定直线旋转一周所形成的旋转面为中轴面的壳体。波纹管为一种典型的旋转壳，以给定的波形绕轴线旋转一周形成旋转面。

薄壳理论的旋转对称壳问题是指外力对称于旋转轴的问题，与公路铁路等涵洞波纹管结构在竖向呈对称荷载作用不同，但当涵洞埋地深度较深，或埋设于水中，活载作用可以忽略时，可视为旋转轴对称问题。石油、化工等行业波纹管等埋地结构在无活载作用时可视为旋转轴对称问题。

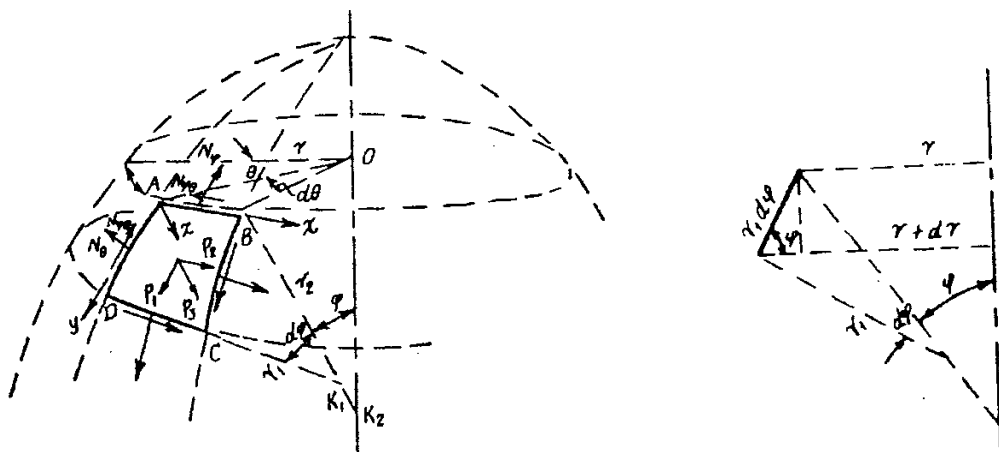


图 3-1 旋转对称壳的地理坐标

#### 1. 旋转对称壳的平衡方程

如图 3-1 所示，取旋转对称壳中曲面的一部分来分析，采用地理坐标系，以经线为  $\alpha$  线，取  $\alpha = \varphi$ ， $\varphi$  为纬度的补角，从旋转轴量起，以平行圆为  $\beta$  线，取  $\beta = \theta$ ，

$\theta$  为经度, 从任一平行圆半径量起, 经线的曲率半径为  $r_1$ , 另一主曲率半径为  $r_2$  (对波纹管涵为纬线曲率半径)。拉梅参数  $A=r_1, B=r_2, \sin \theta = r, r$  为平行圆半径。

平衡方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial(rN_\varphi)}{\partial\varphi} + r_1 \frac{\partial N_{\varphi\theta}}{\partial\theta} - N_\theta r_1 \cos\varphi + r r_1 p_1 = 0 \\ \frac{\partial(rN_{\varphi\theta})}{\partial\varphi} + r_1 \frac{\partial N_\theta}{\partial\theta} - N_{\varphi\theta} r_1 \cos\varphi + r r_1 p_2 = 0 \\ \frac{N_\varphi}{r_1} + \frac{N_\theta}{r_2} + p_3 = 0 \end{cases} \quad (3-1)$$

式中  $p_1, p_2, p_3$  为外力,  $N_\varphi$  和  $N_\theta, N_{\varphi\theta}$  为内力。

引入  $U = N_\varphi r_2 \sin^2 \varphi, V = N_{\varphi\theta} r_2^2 \sin^2 \varphi$  则平衡方程组可表示为:

$$\begin{cases} \frac{r_2^2 \sin \varphi}{r_1} \frac{\partial U}{\partial \varphi} + \frac{\partial V}{\partial \theta} = -(p_1 \sin \varphi + p_3 \cos \varphi) r_2^3 \sin^2 \varphi \\ \frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{r_2}{\sin \varphi} \frac{\partial U}{\partial \theta} = -\left(p_2 \sin \varphi - \frac{\partial p_3}{\partial \theta}\right) r_1 r_2^2 \sin \varphi \end{cases} \quad (3-2)$$

埋地钢波纹管结构属于旋转对称壳, 如果不考虑土压力及汽车荷载效应沿管周分布的不均匀问题, 可视为管受内压或相等外压作用, 则在受力上沿管周方向存在荷载与经度  $\theta$  无关, 此时荷载仅是  $\varphi$  的函数, 即  $P_1 = P_1(\varphi), P_2 = P_2(\varphi), P_3 = P_3(\varphi)$ , 在此荷载作用下, 各内力素也将与经度  $\theta$  无关, 则上述平衡方程组可简化为:

$$\begin{cases} N_\varphi = \frac{C_1}{r_2 \sin^2 \varphi} - \frac{1}{r_2 \sin^2 \varphi} \int (p_1 \sin \varphi + p_3 \cos \varphi) r_1 r_2 \sin \varphi d\varphi \\ N_\theta = -p_3 r_2 - \frac{C_1}{r_1 \sin^2 \varphi} + \frac{1}{r_1 \sin^2 \varphi} \int (p_1 \sin \varphi + p_3 \cos \varphi) r_1 r_2 \sin \varphi d\varphi \\ N_{\varphi\theta} = \frac{C_2}{r_2^2 \sin^2 \varphi} - \frac{1}{r_2^2 \sin^2 \varphi} \int p_2 r_1 r_2^2 \sin^2 \varphi d\varphi \end{cases} \quad (3-3)$$

式中  $C_1, C_2$  为积分常数。

## 2. 旋转对称壳的几何方程

采用地理坐标系, 几何方程为:

$$\begin{cases} \frac{1}{r_1} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{\omega}{r_1} = \varepsilon_\varphi \\ \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{ctg\varphi}{r_2} u - \frac{\omega}{r_2} = \varepsilon_\theta \\ \frac{1}{r_1} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{ctg\varphi}{r_2} v + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = \gamma_{\varphi\theta} \end{cases} \quad (3-4)$$

式中  $u$ 、 $v$ 、 $\omega$  为位移,  $\varepsilon_\varphi$ 、 $\varepsilon_\theta$  和  $\gamma_{\varphi\theta}$  为应变。

在轴对称变形的情况下,  $\gamma_{\varphi\theta} = N_{\varphi\theta} = 0$ , 位移分量  $v$  以及所有对  $\theta$  的导数亦均为零, 因此, 有:  $\varepsilon_\varphi = \frac{1}{Eh} (N_\varphi - \mu N_\theta)$ ,  $\varepsilon_\theta = \frac{1}{Eh} (N_\theta - \mu N_\varphi)$ ,  $\gamma_{\varphi\theta} = \frac{2(1+\mu)}{Eh} N_{\varphi\theta}$

物理方程可改为:

$$\begin{cases} \frac{1}{r_1} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{\omega}{r_1} = \frac{1}{Eh} (N_\varphi - \mu N_\theta) \\ \frac{ctg\varphi}{r_2} \mu - \frac{\omega}{r_2} = \frac{1}{Eh} (N_\varphi - \mu N_\theta) \end{cases} \quad (3-5)$$

消去  $\omega$  后, 则可得旋转对称壳在对称变形下的位移  $u$  的通解为:

$$u = \sin \varphi \left[ \int \frac{f(\varphi)}{\sin \varphi} d\varphi + c \right] \quad (3-6)$$

$\omega$  可由上式相应解得, 其中  $C$  为积分常数。

### 3. 关于薄壁圆管涵洞的讨论

实际上如果不考虑在波形上管受力的差异, 可以理解波纹管涵洞为轴对称壳 (圆管), 其应力与  $\phi$  无关仅与经度  $\theta$  有关,  $p_1 = p_1(\theta)$ ,  $p_2 = p_2(\theta)$ ,  $p_3 = p_3(\theta)$ 。相应地, 各内力素也与  $\phi$  无关, 则平衡方程组可简化为:

$$\begin{cases} \frac{dV}{d\theta} = -(p_1 \sin \varphi + p_3 \cos \varphi) r_2^3 \sin^2 \varphi \\ \frac{dU}{d\theta} = \left( p_2 \sin \varphi - \frac{\partial p_3}{\partial \theta} \right) r_1 r_2 \sin^2 \varphi \end{cases} \quad (3-7)$$

相应的位移分量也与  $\varphi$  无关, 即:

$$\begin{cases} -\frac{\omega}{r_1} = \varepsilon_\varphi \\ \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{ctg\varphi}{r_2} u - \frac{\omega}{r_2} = \varepsilon_\theta \\ \frac{ctg\varphi}{r_2} v + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} = r_{\varphi\theta} \end{cases} \quad (3-8)$$

### 3.1.2 薄壳的非线性理论

一个理想的薄壳中，当外荷载很小时，薄壳中只存在着薄膜力，不存在弯曲变形；当荷载达到临界值时，薄壳中突然产生弯曲变形。有些薄壳厚度与曲率半径之比  $t/r$  很小，往往当其外荷载抵达临界力时，其所产生的应力已经超过了它的弹性极限，已经或开始进入塑性状态。这种情况下为了研究其超过临界力后的变形状态，必须研究薄壳的有限变形问题，即薄壳的大挠度问题。

所谓大挠度是指薄壳中所产生的最大挠度是与其厚度  $t$  在大小上是相当的那种情形，即  $t$  与最大挠度同量级。这时当薄壳加载至某临界力时，壳体本身可能将出现突然的大变形（跳跃问题），也可能控制在某一变形不变而大大减小其荷载达到另一种平衡状态。

弹性体的分析主要来源于平衡方程组、物理方程组和几何方程组与应变连续条件三类方程组。而薄壳大挠度的非线性部分主要来源于几何方程组。

薄壳大挠度问题的几何方程为：

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x} - k_1 w + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y} - k_2 w + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \end{cases} \quad (3-9)$$

其中， $k_1$ 、 $k_2$  为两个主曲率（ $1/r_1, 1/r_2$ ）为常数。

应变连续性方程为：

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{12}}{\partial x \partial y} = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - k_1 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3-10)$$



物理方程与小挠度问题相同:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2) \\ N_2 = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1) \\ N_{12} = \frac{Eh}{2(1+\mu)} \gamma_{12} \\ M_1 = -D(x_1 + \mu x_2) = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \\ M_2 = -D(x_2 + \mu x_1) = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \\ M_{12} = -D(1-\mu)x_{12} = -D(1-\mu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{array} \right. \quad (3-11)$$

假设薄壳上只作用法向力  $P_3=Z$ ,  $P_1=P_2=0$ , 且在平衡方程  $\Sigma X=0$ ,  $\Sigma Y=0$  中,  $Q/r$  项非常小, 假设挠度  $w$  较大, 而  $u$ 、 $v$  很小, 则有简化的平衡方程:

$$\frac{\partial Q_1}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial y} + N_1(k_1 + x_1) + N_2(k_2 + x_2) + 2N_{12}x_{12} + Z = 0 \quad (3-12)$$

引入艾雷应力函数 $\Phi$ ,

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N_1}{h} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}; \\ \sigma_2 = \frac{N_2}{h} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}; \\ \tau_{12} = \frac{N_{12}}{h} = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \end{array} \right.$$

广义拉普拉斯算子为

$$\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2}$$

则薄壳大挠度问题的基本方程组为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{P}{h} \nabla^2 \nabla^2 w = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + k_2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{Z}{h} \\ \frac{1}{E} \nabla^2 \nabla^2 \Phi = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - k_2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - k_1 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{array} \right. \quad (3-13)$$

对薄壳大挠度问题仅在简单情况下可以直接求解, 一般可采用近似解法, 常用的有布勃诺夫-伽辽金法和李滋-铁摩兴柯法, 此外也有用其它的近似方法如摄动法等等。

钱伟长的摄动法是用中心点的挠度与板厚的比值作为参数,以其幂级数展开微分方程中的未知量,代回微分方程后,依照该参数的幂次分解为若干个方程,低阶解依次代入较高阶的方程,就对线性解作出摄动性的修正,由此得出非线性解摄动次数越多,结果越准确。

## 3.2 波纹管的力学性能研究方法及进展

波纹管的力学性能研究的主要方法有工程计算法、解析法和数值法。

### 3.2.1 工程计算法

工程计算法大多采用直梁或曲梁模型对波纹管进行简化处理,而后应用材料力学的方法给出一些简单的设计公式和图表以供工程使用。比较典型的研究应用主要有以下几类:(1)著名的美国膨胀节制造商协会标准——EJMA 标准,以此作为其应力设计的基础;(2)Litingxin 等将波纹管简化为等直杆研究波纹管的轴向自由振动特性;(3)Hamada M 等将细长比较大的 U 形波纹管视为简单支承梁柱,采用 Euler 公式给出波纹管临界失稳压力并附以设计曲线;(4)Hu jian 研究了 U 形波纹管在内压和外压作用下的失稳机理,并给出其平面失稳临界压力公式;(5)Qing Yi 等对波纹管在外压作用下的临界破坏压力进行了梁式模型理论计算和实验验证;(6)樊大均对波纹管的各种工程计算作了较详细的阐述。

总的看来,波纹管的这种杆梁计算模型在工程设计或大系统分析中研究内压和外压问题是有效的,但用于其自身的静动态分析显粗糙,不能反映波形对应力应变的影响。在涵洞工程中,如果采用工程计算方法则是将波纹管类似于圆管,仅在刚度上作适当等效(国外部分采用),并不能真正反映波纹管的优势,也不能区分波纹管与圆管的差异,不能反映涵洞竖向受荷特征。

### 3.2.2 解析法

解析法是把波纹管看成由两个半圆环壳与圆环板组合而成并将其求解问题看成圆环壳与圆环板的求解问题。利用圆环壳和圆环板的线性理论,把圆环壳和圆环板的有关方程式代入连接条件,得到一系列的方程,通过联立求解,得到 U 形波纹管在轴向自由位移与内压下一系列的刚度及最大弯曲应力曲线及公式。钱伟长等从 Reissner—Meissner 轴对称壳方程出发,提出了细环壳的一般解,并利用这个一般解将 C 形波纹管单元按正负两个细环壳处理,对其在轴向力和内压作用下的变形和应力分布进行了系统的计算,提出了工程设计公式。陈山林等将上述方法作了推广,给出了环壳一般

轴对称问题的精确解,这一方法可处理任意荷载作用下的旋转轴对称环壳问题。

由于工业上的波纹管多采用钢等材料制成,所以,在一般弹性范围内可以达到很大的位移,呈现较强的非线性。钱伟长利用解析解与摄动解相结合的方法,分析了 U 形波纹管的大挠度问题。分析时,把 U 形波纹管的半个波分成三部分,即内外环壳部分和环板部分,并认为波纹管的围压受力变形主要由环板承担,非线性集中在环板部分,可用小参数摄动法得出环板部分的非线性解,环壳部分属细环壳,其解采用已有的线性解,通过与环板的各级摄动解相连接而获解。

徐志翘等人采用摄动法对环板变厚度 U 形波纹管的大挠度问题进行了研究,研究中仅考虑环板部分的厚度变化,环壳部分仍按等厚度计算。Hu Liang 的 U 形波纹管非线性摄动解,扩展了钱伟长和徐志翘的研究,其一是考虑了波纹管内外环壳的中面法线的中等小转角(即考虑了环壳部分的非线性);其二是考虑了波纹管的压缩角,将内外环壳间的连接部分看作是变厚度的非线性浅截锥壳。

总体上解析法分析波纹管不但受到波形的限制,而且计算冗长复杂,随着计算技术的发展,数值算法已成为一种行之有效的方法。

### 3.2.3 数值法

分析波纹管力学特性的数值法主要有有限差分法和有限元法等。有限差分法是在研究 U 形波纹管的非轴对称弯曲时,将各物理量沿环向用 Fourier 级数展开,再将其半波沿子午向用有限差分法离散,得到弯矩作用下波纹管应力和刚度变化曲线。安德列娃应用 Newton 法和差分法对波纹管的非线性特性作了研究,即先用 Newton 法将 Reissner 非线性方程化为若干个线性方程,然后用差分方程代替线性化的微分方程进而获解。

有限元法发展到今天,已成为工程数值分析的有力工具,它在波纹管的力学计算中也得到了广泛应用。这种方法用于波纹管的分析,较之解析法可不受波纹管波形的限制,较之差分法可避免计算的不稳定性,较之实验法可节约大量实验费用。有限元分析时,将波纹管视为旋转薄壳结构,这种结构由于其几何上的对称性及在厚度方向引入了壳体理论中的 Kirchhoff 假设,使其本质上成为一维单元,从而大大简化了整个分析过程。Tsukimori k 等和 Iwata K 等,研究了 U 形波纹管在内压及外压作用下的屈曲问题,给出波纹管柱状失稳和平面失稳的临界压力。谢志诚等对在轴对称载荷作用下的波纹管进行了有限元分析,提出了一种考虑曲率影响的、以壳的径向切线转角为

连续参数的截锥单元有限元法,并用于处理 C 形波纹管问题;朱益民等基于小应变、有限位移的假设,用有限元法对中等转动波纹管的轴对称几何非线性特性作了分析;张进国等采用三结点曲边单元,将问题进一步扩展到非轴对称几何非线性上来。

应用于钢波纹管涵洞时,工程算法不能反映该结构的受力特征,不能完全反映波形对受力的影响;目前理论解析解法均不适用竖向受力的涵洞工程,数值法成为钢波纹管涵洞研究的主要工具。

### 3.2.4 国内外相关行业钢波纹管结构的分析方法

#### 1. 国内石油化工等行业设计

与埋地钢波纹管涵洞的受力不同,石油化工等行业的波纹管目的是提供轴向的位移补偿,主要采用美国膨胀节制作商协会标准(EJMA)无加强膨胀节的计算方法,用弹性直梁理论简化处理,分别计算内压引起的 U 形波纹管直边段周向薄膜应力 $\sigma_z$ 、波纹管周向薄膜应力 $\sigma_1$ 、径向薄膜应力 $\sigma_2$ 、径向弯曲应力 $\sigma_3$ ,按静力平衡条件简化计算轴向伸缩变形引起的波纹管径向薄膜应力 $\sigma_4$ ,按弹性曲梁计算轴向伸缩变形引起的波纹管径向弯曲应力 $\sigma_5$ ;单波弹性刚度按一端固定一端平动的弹性曲梁推导计算。外压核算将波纹管视为一当量圆筒进行校核,厚度为一断面惯性矩等于波纹断面惯性矩 $I_1$ 的圆筒体。

#### 2. 原联邦德国 AD 规范

原联邦德国 AD 规范按静力平衡条件推导,由内压产生的波纹管的周向薄膜应力来计算壁厚 $S$ 。也按两端固定均布荷载直梁用塑性理论,由内压产生的波纹管径向弯曲应力来计算壁厚。

#### 3. 日本 JISB8243 压力容器构造关于波纹管计算

“日本 JISB8243 压力容器构造”按两端固定均布荷载弹性直梁推导出内压和位移产生的波纹管的径向弯曲应力 $\sigma_3$ 、 $\sigma_5$ 。

“石化设计规定”和“JISB8243”是基于弹性理论,弹性理论法相对保守;而“AD”是基于塑性理论,更能充分利用材料的强度,有助于减小壁厚。公路波纹管涵洞与化工等行业波纹管结构在受力上存在明显不同,化工等行业波纹管结构主要受围压,提供轴向变形能力;而公路波纹管涵洞结构主要承受土自重和汽车活载,提供轴向和竖向变形能力,这样相关行业的分析方法难以直接应用。

当填土高度较高且形成一定的土拱效应后,汽车荷载在波纹管涵洞上的效应很小

时,可参考上述计算方法仅考虑围压的影响。当波纹管应用于隧道或水洞,不存在汽车荷载作用,且不采用反开槽回填施工时,可使用上述公式计算分析,但采用反开槽回填施工时应考虑施工工艺对受力特征的影响。

总之,其它行业波纹管计算分析方法与公路波纹管涵洞在受力特征和荷载组合等方面存在较大差异,不能反映我国公路涵洞结构的实际受力状况,很难直接应用,因此不能盲目套用。

### 3.3 钢波纹管涵洞的有限元分析及其精度

#### 3.3.1 分析方法与判据

##### 1. 分析方法

在对波纹管涵进行野外测试的基础上,利用有限元分析程序,用数值法对不同的填土高度、不同波形、不同壁厚、不同管径及不同荷载作以分析,揭示最大有效应力与相关各因素之间的关系,旨在为钢波纹管涵洞的设计工作提供依据。现场采用反开槽回填法施工,故本文分析均对应反开槽回填法施工工艺,通过建立力学模型,把计算结果和实测值进行对比分析,经精度分析后按照合理的力学模型对不同波形、不同壁厚、不同管径的波纹管在不同填土高度时施加不同荷载进行有限元分析计算,将结果进行分析,得出相应规律,指导钢波纹管涵洞的设计与施工。

##### 2. 结果分析判据

关于材料破坏规律的假设或学说(称为强度理论)目前主要有四个:即针对脆性材料断裂破坏的最大拉应力理论(第一强度理论)和最大拉应变理论(第二强度理论)以及针对塑性材料屈服破坏的最大剪应力理论(第三强度理论)和八面体剪应力理论(第四强度理论)。金属波纹管所用钢材属于塑性材料,对其强度的校核一般采用第三强度理论或第四强度理论。第三强度理论认为引起材料屈服的主要因素是最大剪应力,而且不论材料处于何种应力状态,只要最大剪应力  $\tau_{\max}$  达到材料单向拉伸屈服时的最大剪应力  $\tau_s$ ,材料即发生屈服。由此得出相应的强度条件为:

$$\sigma_{eq3} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \quad (3-14)$$

对于塑性材料来说,这一理论与试验结果很接近,因此在工程中得出广泛应用。但其缺点是未考虑主应力  $\sigma_2$  的影响,而试验表明  $\sigma_2$  对材料的屈服是有影响的。

第四强度理论认为材料屈服的主要原因是八面体剪应力,而且不论材料处于何种

应用状态，只要八面体剪应力  $\tau_{8\max}$  达到材料单向拉伸屈服时的八面体剪应力  $\tau_{8s}$ ，材料即发生屈服，由此理论得出的强度条件为：

$$\sigma_{eq\bullet 4} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (3-15)$$

试验表明，对于塑性材料，第四强度理论比第三强度理论更符合试验结果。

本分析中采用第四强度理论作为判据。第四强度  $\sigma_{eq\bullet 4}$  对应有元分析中的等效应力 SEQV，最大等效应力（用  $s_{eqv}^{\max}$  表示）满足式（3-16）则认为波纹管涵管壁钢板可以满足强度要求。

$$s_{eqv}^{\max} \leq [\sigma] \quad (3-16)$$

### 3.3.2 模型的建立及分析过程

#### 3.3.2.1 创建模型

在创建波纹管的几何模型时，先建立半个波纹波形曲线，然后再把所建线关于工作面镜面映象，便可创建出一个完整的波形曲线，按照此法可以映象出计算需要的波形曲线，所创建的曲线用布尔操作将其粘贴在一起。

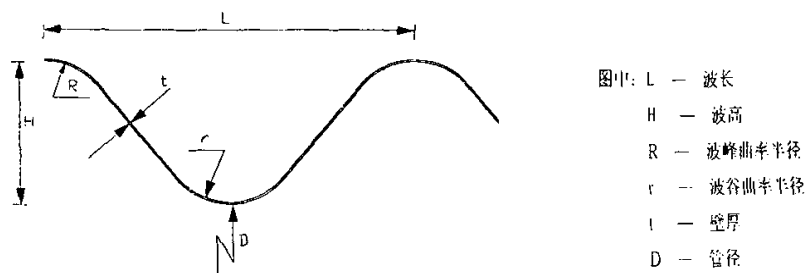


图 3-2 波形大样图

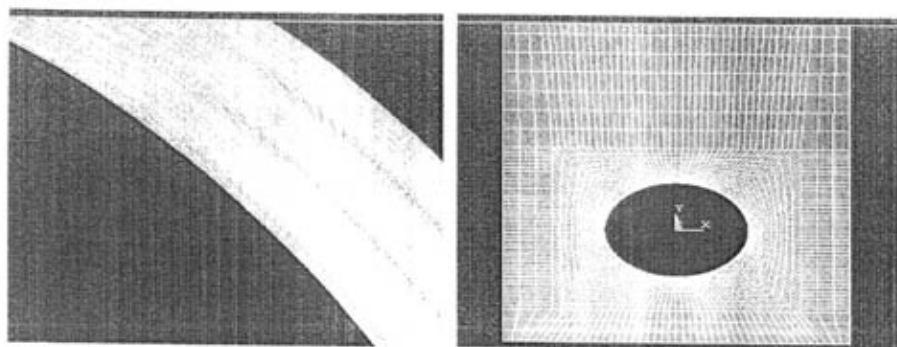


图 3-3 划分的波纹管及土体网格

划分有限元网格的顺序为:先划分波纹管,后划分波纹管周围的土体。

### 1. 模型尺寸

通过参考相关资料和操作实践,沿波纹管的轴线方向取 2~3 个波长作为模型的  $z$  轴方向尺寸;波纹管基础回填材料取 1 米,波纹管顶填土高度按实际分别取 0.5 米、1 米、2 米、3 米、4 米、5 米和 10 米,此尺寸为模型的  $y$  轴方向尺寸;水平方向管两侧填土各取 1 米,为模型的  $x$  轴方向。

### 2. 单元类型的选取及单元数目的控制

为达到应有的计算精度,波纹管的单元形状取四边形,若取三角形单元将会引起模型的几何误差,会导致计算结果偏差过大。将波纹管的单元类型取为壳单元,将土体单元取为六面体八节点实体单元。单元的数目不是越多越好,一般的原则是:在达到计算精度要求的前提下,尽量减少单元的数目,一般将单元的数目控制在 5~10 万个单元左右。在划分单元时,波纹管上的单元尺寸需小些,管附近的土体单元尺寸可略大些,远离管的土体单元尺寸可更大些。

### 3. 边界条件

在确定好模型尺寸和单元类型后,还需依据实际情形确定合适的边界条件。不同的边界条件对计算结果影响很大,如何确立切合工程实际的边界条件,需要在理论分析的基础上通过实际操作实践,对比计算值和实测值,然后做出合理的选择。经分析,备选的边界条件有以下三种,如图 3-4 所示。

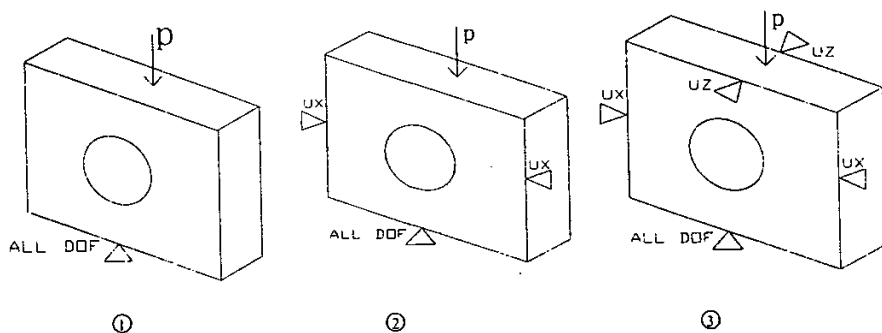


图 3-4 备选的边界条件示意图

边界条件①:底面约束所有位移和扭转自由度,即施加 ALL DOF ( $UX,UY,UZ,ROTX,ROTY,ROTZ$ )约束,其余面不施加自由度约束,顶面施加荷载;此条件对应于仅在管两侧填土,路堤未填土。

边界条件②:底面约束所有位移和扭转自由度施加 ALL DOF 约束,管两侧立面

施加水平位移约束 UX，顶面施加荷载，其余面自由；此条件对应于反开槽回填施工工艺。

边界条件③：底面约束所有位移和扭转自由度施加 ALL DOF 约束，管两侧立面施加水平位移约束 UX，垂直于管轴线的前后立面施加水平位移约束 UZ，顶面施加荷载；此条件对应于路堤法施工工艺。

### 3.3.2.2 求解输入

#### 1. 材料属性参数

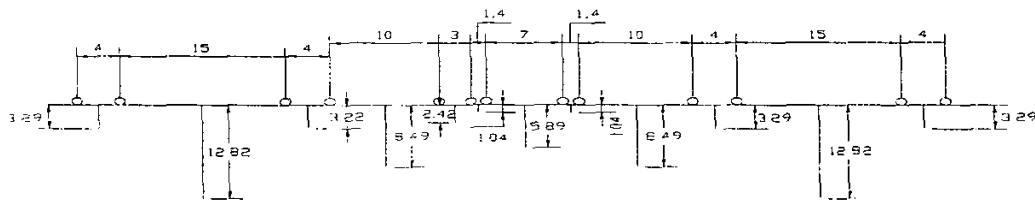
本计算涉及到的材料参数采用波纹管试验涵的实测值。管身钢板：密度  $\rho_1 = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量  $E_1 = 2.1 \times 10^8 \text{ kPa}$ ，泊松比  $\mu_1 = 0.3$ ；基础回填和两侧回填材料：密度  $\rho_2 = 1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量  $E_2 = 18000 \text{ kPa}$ ，泊松比  $\mu_2 = 0.25$ 。

#### 2. 顶面荷载的施加方法

由于计算模型是从工程实体中切割出来的，故在施加顶面荷载的时候，需减去所取模型周围的土体分担的荷载效应，参照《土力学及路基》的相关理论，依照《公路桥涵设计手册（涵洞）》中“涵洞结构的验算”，路面荷载在土体中以与垂直方向成  $30^\circ$  夹角向下扩散，依此计算出传递到波纹管顶的均布压力的大小和分布区域，再以此值按分布区域反推并施加在模型顶面。经过实际操作运算，这种施力方式所得的计算值和实测值拟合很理想。

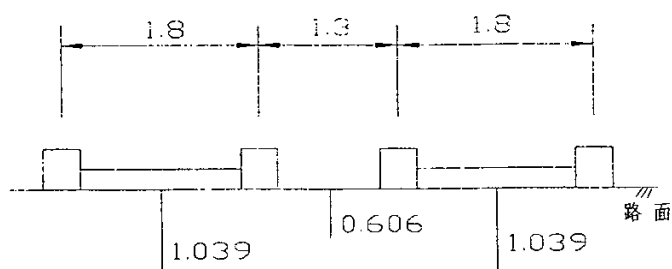
当路面横向布置车队列数大于 2 时，应考虑计算荷载效应的横向折减，但折减后的效应不得小于两列车队布载的计算结果。横向折减系数参照《公路工程技术标准》中的规定取值。

#### 3. 荷载传递交叉点深度 h 值的计算



a 纵向分布图





b 横向分布图

图 3-5 汽超-20 级荷载分布图

图 3-5 中路面以下垂线段上所表示的尺寸（以米为单位）是相邻两车轮的荷载以与竖直方向成  $30^\circ$  夹角向下传递的交叉点离路面的垂直距离  $h$ ，对于不同的填土高度，参照上图可计算出汽超-20 级荷载传递到管顶的最大压力及分布区域。

两轮的荷载在土体中向下传递辐射的交叉点在路面下的深度用下式计算：

$$h = \frac{\text{两轮间距} - \text{后轮着地长度}/2 - \text{前轮着地长度}/2}{2 \tan 30^\circ}$$

当管顶填土高度大于或等于所计算出的  $h$  值时，就要同时考虑这两个轮子对波纹管的压力，否则，只需考虑较重的那个车轮对波纹管顶产生的压力。

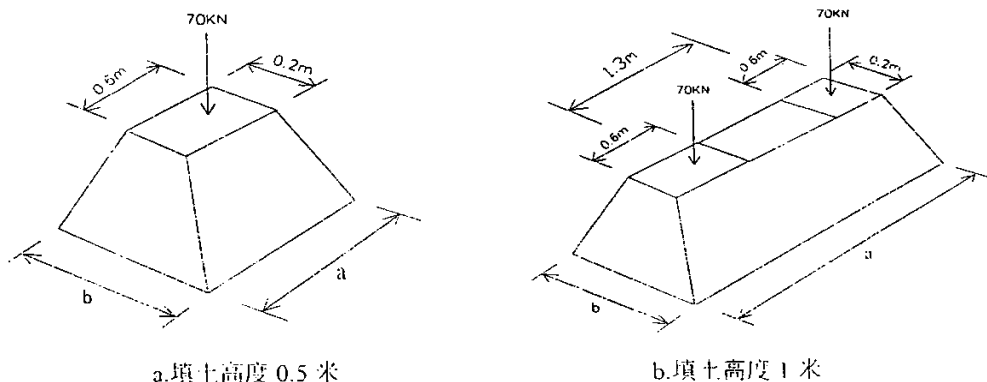


中、后轮

前轮

图 3-6 着地面尺寸

同样，前轴和后轴（中轴）的荷载在土体中向下传递辐射的交叉点也可采用相似的方法计算得到。管顶不同填土高度时，汽车荷载（超-20 级）在模型中的作用如图 3-7 所示。



a. 填土高度 0.5 米

b. 填土高度 1 米

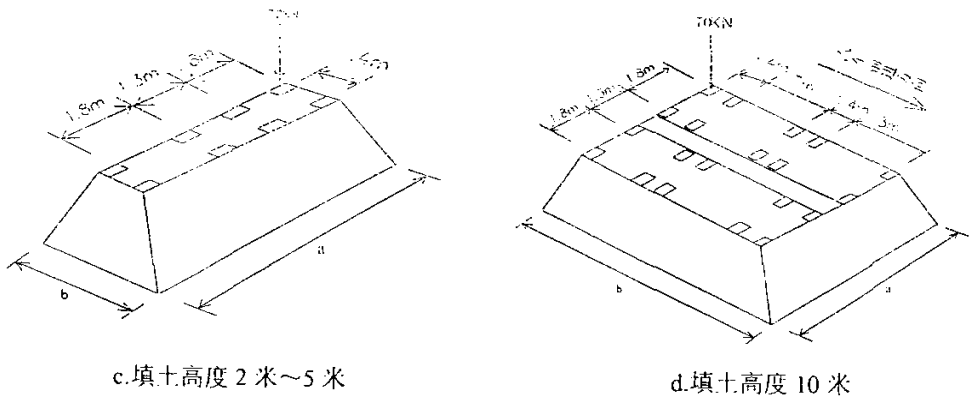


图 3-7 不同填土高度汽车荷载作用示意图

4. 不同填土高度时，汽超-20 级荷载在模型中的施加值

管顶不同填土高度时，汽超-20 级荷载在模型中的施加值见表 3-1。

表 3-1 汽超-20 级荷载在模型中的施加值

填土高度，m	汽超-20 级荷载 施加值，kPa	荷载扩散 宽度尺寸 a，m	荷载扩散 长度尺寸 b，m
0.5	76.48	1.1774	0.7774
1	34.99	3.0547	1.3547
2	18.34	3.9094	18.3435
3	12.34	8.9640	5.6040
4	8.90	10.1188	6.2188
5	6.74	11.2735	7.3735
10	2.63	17.0470	24.5470

3.3.3 模型计算的精度分析

3.3.3.1 涵洞几何非线性分析

前文分析得到：薄壳中所产生的最大挠度是与其厚度同量级，且当薄壳加载至某临界力时，壳体本身可能将出现突然的大变形（跳跃问题）。如果结构经受大变形，它的几何形状可能会引起的非线性响应，相应地刚度也将发生变化，这时需要采用大变形的几何非线性分析方法。

本文在有限元几何非线性分析时，首先注意了单元划分，壳体单元采用四面体进行细化，避免大的纵横比、过度的顶角以及具有负面积的扭曲单元；其次，在大挠度分析中，假定应变是小的，采用线性程序，即“小应变大变形”；第三，采用逐步加载的方法，提高系统的收敛特性，以保持精度；第四，采用二分法并打开自动时间步长，提高工作效率；第五，对于波纹管壳单元，在大挠度分析中使用应力刚化，以得到精确的解。

表 3-2    大应变与小应变分析计算值对比

工况	测点	大应变下切向应变, $\mu\epsilon$	小应变下切向应变, $\mu\epsilon$	相对误差, %
1	1	177.97	177.83	0.079
	5	-195.31	-194.97	0.17
	10	202.23	202.06	0.084
工况	荷载情况	大应变下的最大等效应力, MPa	小应变下的最大等效应力, MPa	相对误差, %
2	填土压力	106.059	105.203	0.814
	汽超 20	113.461	112.54	0.818
3	填土压力	204.522	201.272	1.615
	汽超 20	207.54	204.135	1.668

针对涵洞几何非线性作了大应变分析与小应变分析的对比，结果如表 3-2 所示。研究的工况 1 为管顶填土 1.3 米，工况 2 为管顶填土 5 米，工况 3 为管顶填土 10 米。

从表 3-2 可看出：大应变分析与小应变分析的结果非常接近，相对误差从 0.079% 至 1.668% 变化不等；随着填土高度和管顶荷载的增加，采用大应变模型与小应变模型所得运算结果的差异逐渐增大；当填土高度和管顶荷载限定在一定的取值范围时，针对于波纹管涵的有限元分析，相对误差不超过 5%；因此，在波纹管涵的有限元分析过程中，可不考虑大应变，而使用简化的小应变分析模型，不致对结果产生较大的影响。

3.3.3.2    计算值与实测值的对比

为了分析计算结果的可靠性，以 2001 年 10 月~11 月青藏铁路格尔木~拉赤台段进行的波纹管涵的力学检测数据作为对比分析依据，取 DK857+973 波纹管涵洞测区 1 波谷断面 1 为分析对象，按前文所述三种备选的边界条件分别应用在计算模型上作以计算，计算结果如表 3-3 所示。

表 3-3    不同边界条件下的计算值与实测值的对照表

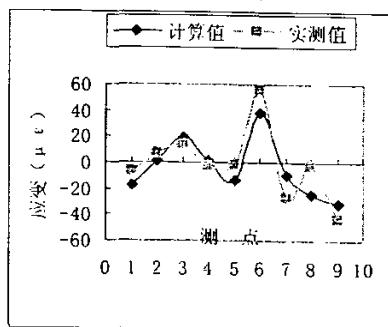
测点	实测值 ( $\mu\epsilon$ )	边界条件①		边界条件②		边界条件③	
		计 算 值 ( $\mu\epsilon$ )	与实测值 误差(%)	计 算 值 ( $\mu\epsilon$ )	与实测值 误差(%)	计 算 值 ( $\mu\epsilon$ )	与实测值 误差(%)
1	110.5	177.83	60.93	111.98	1.34	87.185	20.56
5	-139	-194.97	40.27	-138.19	0.58	-140.63	1.17
10	137.5	202.06	46.95	143.49	4.36	109.89	20.08

注：测点 1 对应于管顶，测点 5 对应于管侧中部，测点 10 对应于管底，应变值为各测点管内侧切向应变。

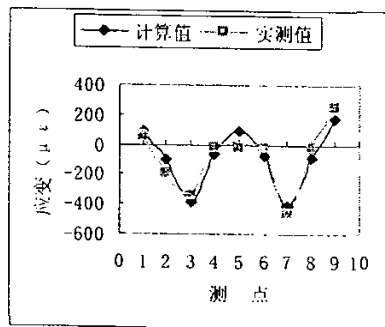
从表 3-3 可看出, 边界条件①与实际偏差太大, 最大误差高达 60.93%, 平均误差也达 49.38%; 边界条件③与实际偏差也较大, 最大误差为 20.56%, 平均误差为 13.94%, 故边界条件①、③进行有限元分析与实际不符。相比之下, 边界条件②的计算值与实测非常贴近, 最大误差仅为 4.36%, 最小误差仅为 0.58%, 误差控制在了 5% 以内, 而且其计算从总体上略高于实测值, 这表明计算值相对保守, 有利安全。从理论分析, 边界条件③对应于路堤法施工工艺 (即在路堤施工中直接埋设涵管), 由于多种因素, 本文后续研究均以边界条件②展开计算分析。

为了进一步验证这一模型用于钢波纹管涵力学性能分析的可行性, 以所实测的 DK857+973 波纹管涵洞各个工况为例, 将有限元理论计算值与实测值进行对比分析如图 3-8 (注: 工况 1-1 为裸管状态, 测试时将其值归零作为原始状态, 其它工况的测试值皆为相对于工况 1-1 而言, 故对比时没有将工况 1-1 列出)。

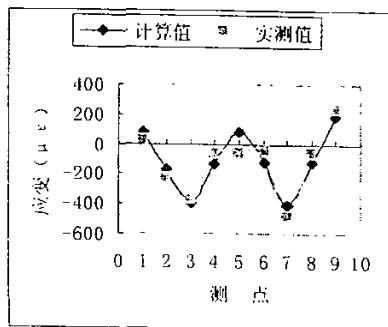
从图中可明显看出, DK857+973 波纹管涵洞各工况下计算机模拟分析的应变变化规律和现场测试的规律一致。



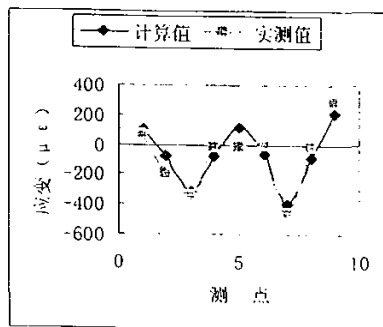
A. 工况 1-2



B. 工况 1-3



C. 工况 1-4



D. 工况 2

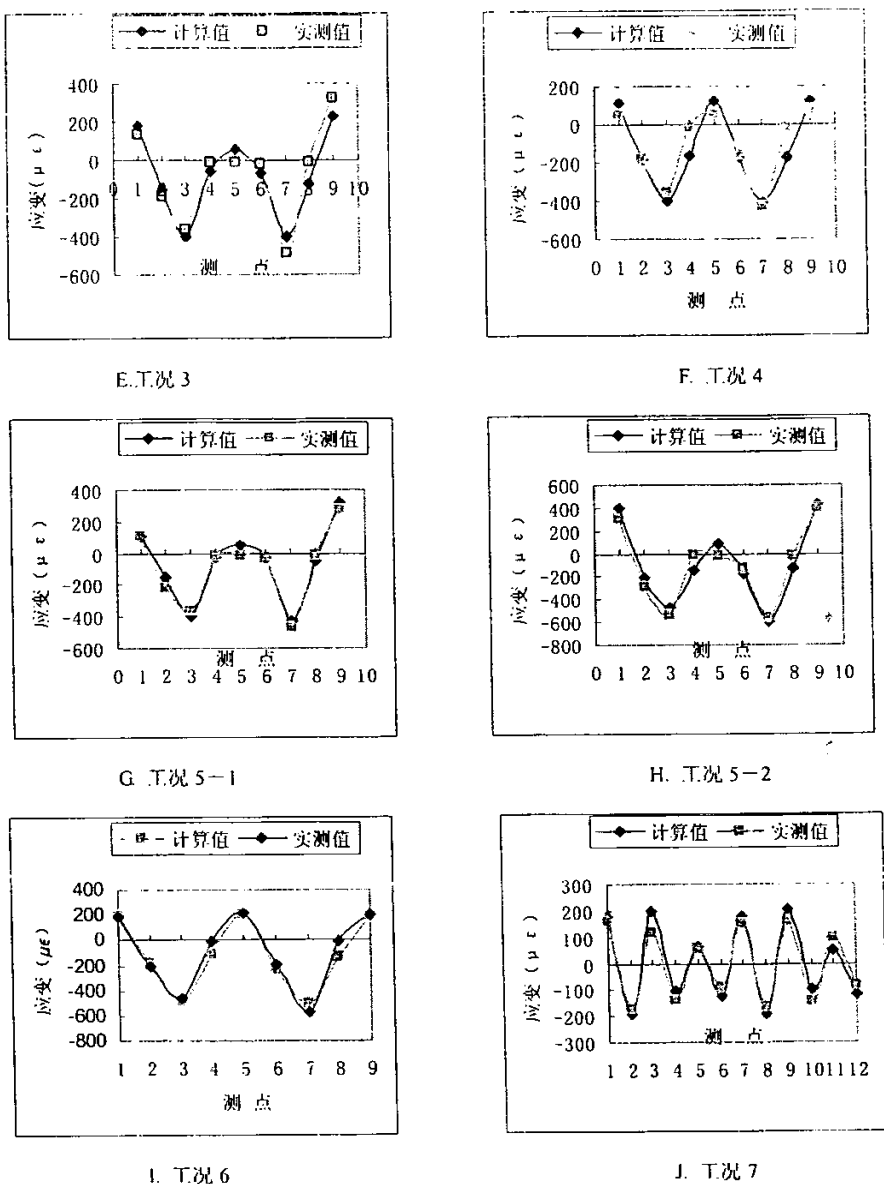


图 3-8 有限元计算值与实测值对比

图 3-8 中个别测点的有限元理论计算值与现场实测值差异较大，经分析有以下几个方面的原因：一方面，测量本身存在误差，且测试时间长，当地温差又大，低温环境下测量应变的仪器响应灵敏度不够高，个别应变片和波纹管壁没有紧密接触、应变片所贴的实际位置和标称位置存在一定的偏差，这些因素均会使得现场实测值不能真实反映波纹管壁的应变；另一方面，模型是理想化的结构体，是对实际情形的简化，而不可能替代实际；此外，波纹管在加工过程中必然对其尺寸和应力造成较大影响，模型也难以用参数予以反映。

尽管有限元理论计算值与现场实测值不尽相同，在个别测点差异较大，但有限元理

论计算值所呈现出的应变变化规律与现场实测值所呈现的是一致的,而且在大多数测点两值非常接近,差异较小,所以完全可以用有限元计算结果分析波纹管的受力状况。

### 3.3.3.3 沿道路轴线方向施加水平约束力对计算结果的影响

从实际情况分析,反开槽施工时槽壁对管身施工了水平约束。表 3-3 中,边界条件①未施加水平约束,边界条件②施加水平约束,边界条件③道路轴线方向和波纹管轴线方向同时施加水平约束力。从表中结果可看出,不施加水平方向位移所算结果远大于实测值,沿道路轴线方向施加水平约束力的计算结果和实测值拟合良好,而沿道路轴线方向和波纹管轴线方向同时施加水平约束力所算结果小于实测值。

### 3.3.3.4 列车荷载下挠度计算的精度

根据实际情况,将列车均布荷载 57.5KPa 施加在模型顶面上,按边界条件②计算所得的管挠度增量为 5.7mm,实测结果为 5.5mm,误差为 3.6%。

综上所述,在波纹管的有限元分析中,按照备选边界条件②和小应变分析结果与实际比较接近。由计算值与实测值的对比分析表明:应用合理的模型进行有限元分析所得的计算结果和现场实测值拟合良好,用本文所建立的有限元分析模型来计算于公路和铁路的钢波纹管涵洞的受力情况是可行的,所得的结论是可靠的。

## 3.4 钢波纹管涵洞的力学分析结果

### 3.4.1 同一波形与壁厚时不同管径与填土高度波纹管涵的受力特征

计算采用的管径  $D$  分别为 0.75m、1.0m、1.25m、1.5m 和 2m,填土高度  $h$  分别为 0.5m、1m、2m、3m、4m、5m、10m,旨在分析管径大小对波纹管涵受力特征的影响。力学特征分析以 r16 R40 L140 H70mm 波形为主,部分计算中采用 r30 R30 L140 H70mm 和 r35 R35 L140 H70mm 波形。

#### 1. 切向应变与轴向应变特征

图 3-9~图 3-10 分别为管径 0.75m~2.0m 管涵在填土恒载时的管内侧切向应变与轴向应变图。

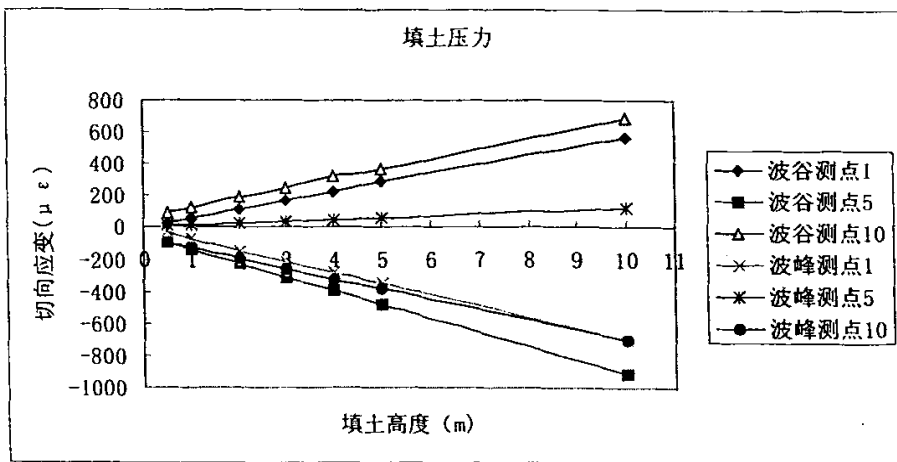
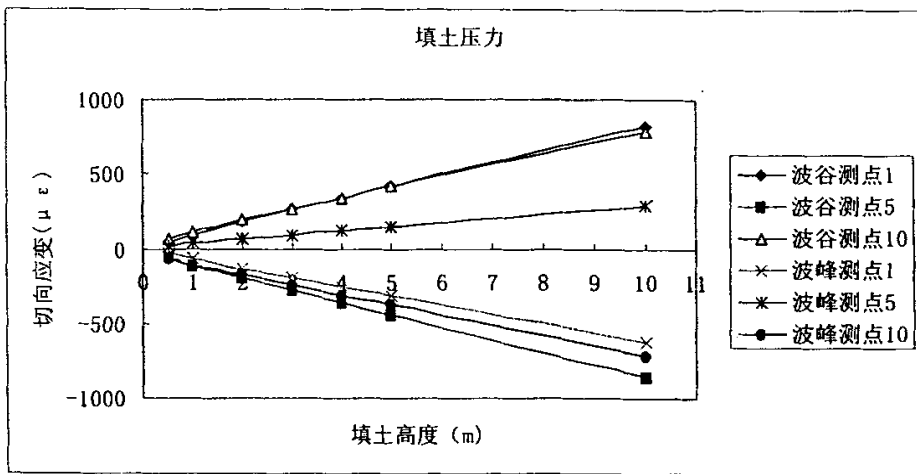
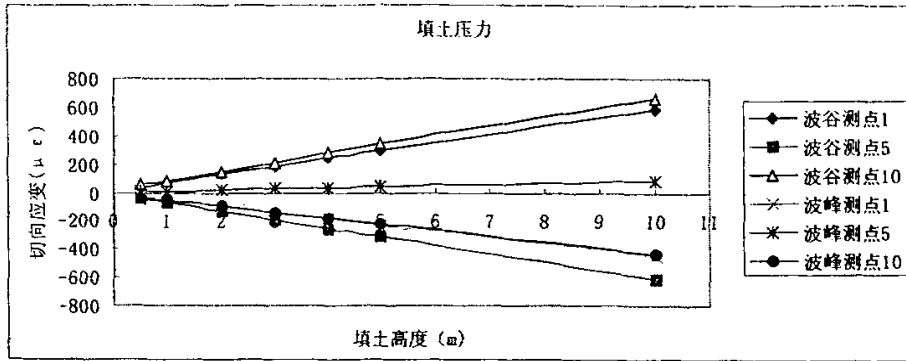
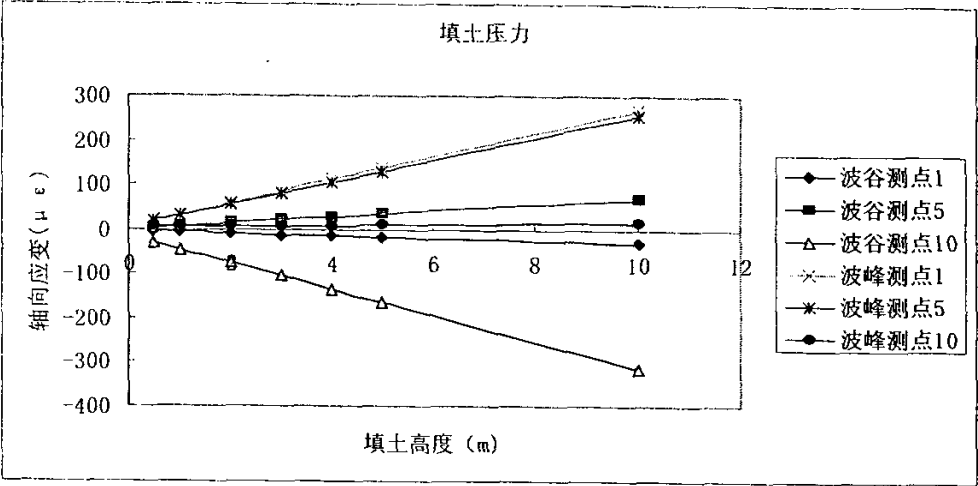
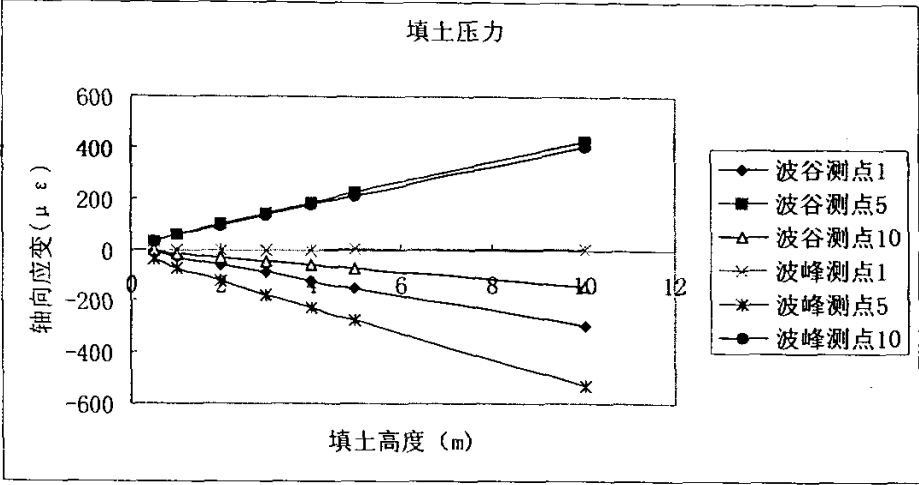


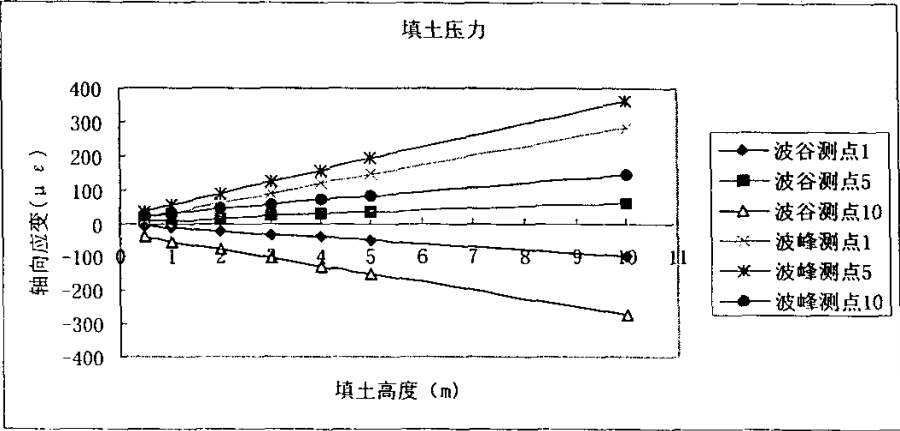
图 3-9 管涵恒载时的切向应变



a 0.75m 管涵



b 1.25m 管涵



c 2.0m 管涵

图 3-10 管涵恒载时的轴向应变



从图中可看出:

(1) 各个管径的管涵在恒载时各测点的轴向和切向应变随填土高度的增加皆有呈线性增长的趋势。

(2) 各个管径的管涵在恒载时内侧切向应变均在管底波谷(拉应变)与管侧波谷(压应变)处值较大,而管侧中部波峰处值较小。

(3) 各个管径的管涵在恒载时内侧轴向应变均在管顶波谷、管底波谷和管侧中部(以下简称管侧)波峰处切向受拉,在管顶波峰、管底波峰和管侧波谷处切向受压。

(4) 切向应变最大值总体上大于轴向应变最大值。

(5) 各个管径的管涵在恒载时轴向应变的拉压性质不像切向应变那样有统一的规律,但总体上,管顶波峰、管底波峰轴向受拉,管底波谷与管顶波谷轴向受压。0.75 米管(按绝对值由大到小排序)在管顶波峰、管侧波峰、管侧波谷与管底波峰处轴向受拉,而管底波谷与管顶波谷轴向受压;1.25 米管(按绝对值由大到小排序)在管侧波谷、管底波峰与管顶波峰处轴向受拉,而管侧波峰、管顶波谷与管底波谷轴向受压;2 米管(按绝对值由大到小排序)在管侧波峰、管顶波峰、管底波峰与管侧波谷处轴向受拉(大小次序与 0.5m 管不同),而管底波谷与管顶波谷轴向受压。

(6) 各填土高度下,每一测点切向应变较大时,轴向应变则相对较小;管径 0.75 米时在管顶管底波峰和波谷以及管侧波谷均出现切向受拉、轴向受压或切向受压、轴向受拉的迹象,而在管侧波峰切向和轴向均受拉。其它管径也有类似的结果。

图 3-11 ~ 图 3-12 为管径 0.75m~2.0m 管涵在不同填土高度下施加汽一超 20 级活载的应变。从图中可以看出:

(1) 施加汽一超 20 级活载后,轴向与切向应变均随填土高度的增加逐渐减小,填土大于一定高度以后的应变值相对于恒载下的应变值显得很小,接近 10m 时活载引起的应变可忽略不计。

(2) 轴向应变的最大值总体上小于切向应变的最大值。

(3) 切向应变均在管顶波峰、管顶波谷处较大,而在管侧波峰处较小。

(4) 轴向应变随管径的不同而呈现不同的特点。0.75 米管在管顶波峰与管底波谷处较大,而在管顶波谷和管底波峰处较小;1.25 米管除在管顶波峰与管底波谷处较小以外,其余测点均较大;2 米管在管侧波谷和管底波峰处较小,当填土高度在 0.5 米 ~ 2 米之间时管顶波峰处的值明显大于其余处的值,而填土高度大于 2 米以后管顶波峰处的值略小于管侧波峰处的值。

(5) 0.75 米管涵，管侧波峰在轴向和切向受拉，而管顶波峰、管侧波谷和管底波谷则出现切向受拉、轴向受压或切向受压、轴向受拉的迹象，即切向、轴向拉压交替。其它管径也有类似的结果。

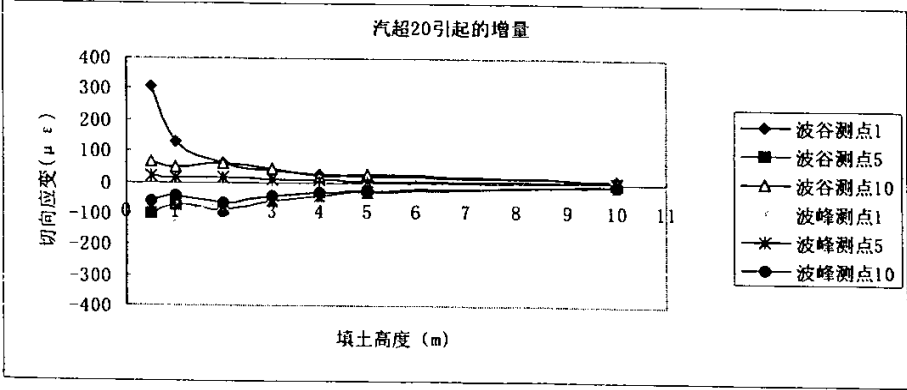
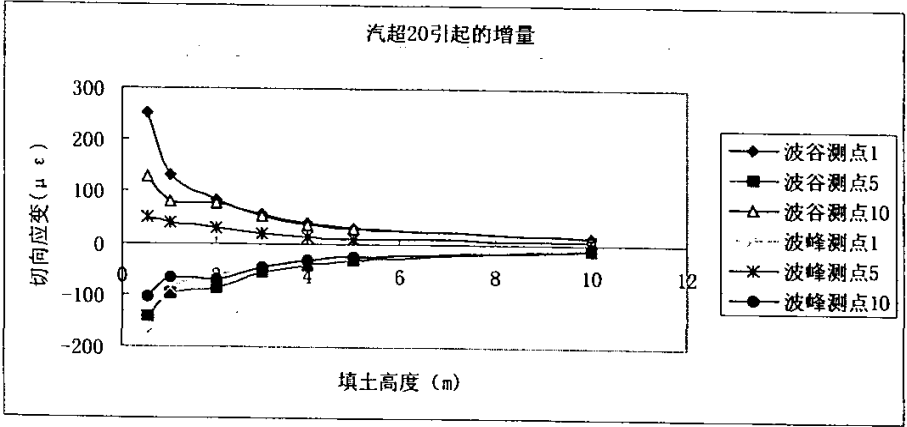
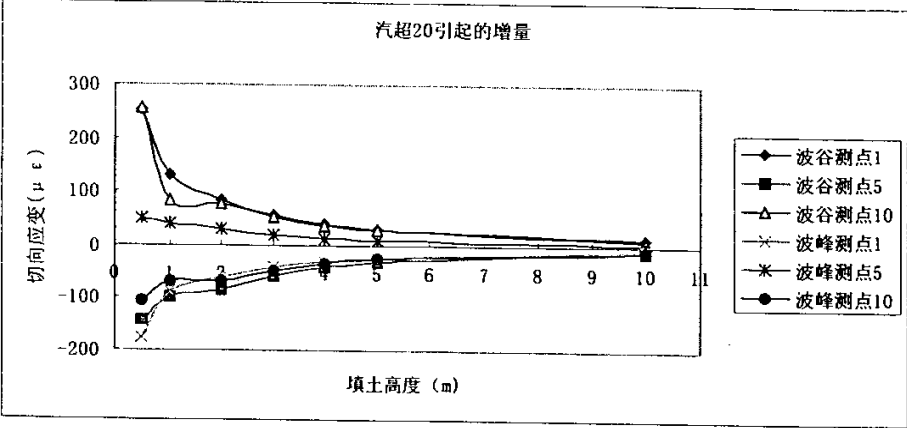
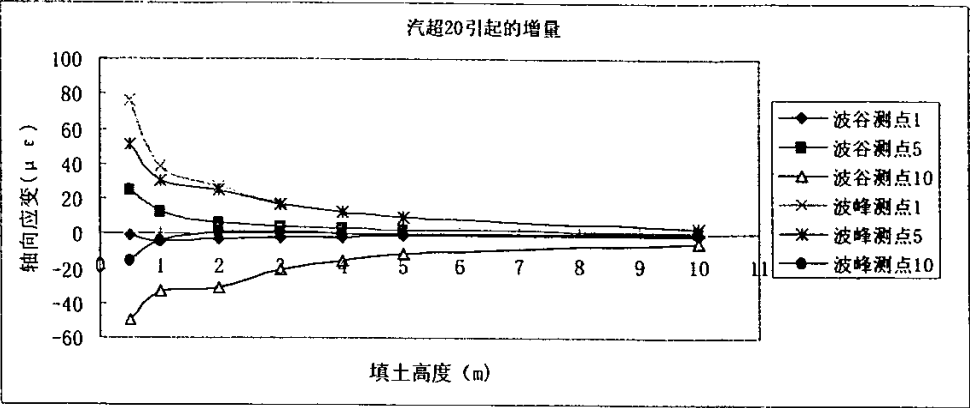
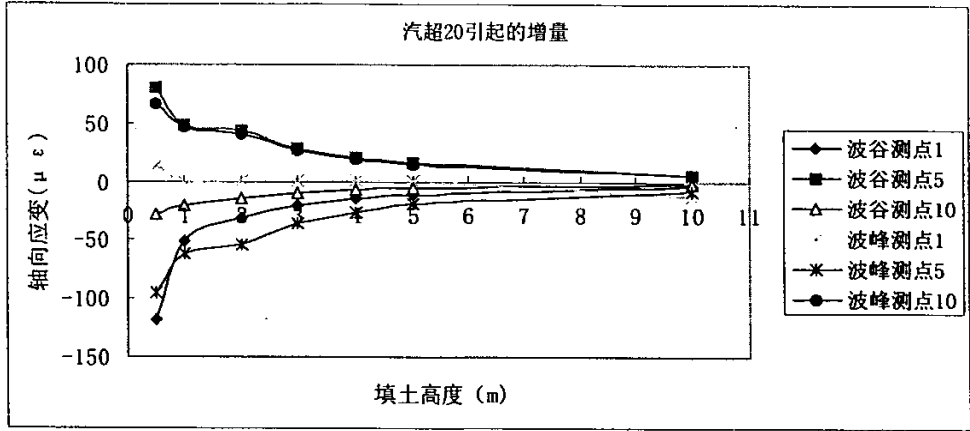


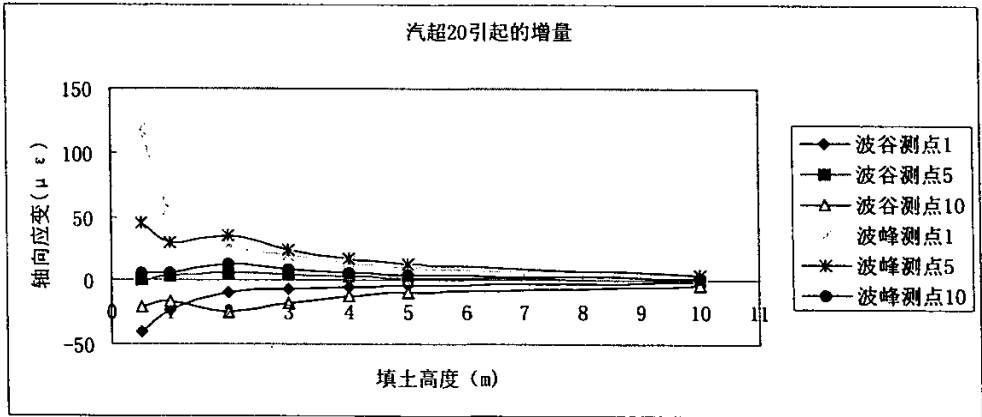
图 3-11 管涵活载引起的切向应变



a 0.75 米管涵



b 1.25 米管涵



c 2 米管涵

图 3-12 管涵活载引起的轴向应变

2. 切向应变与轴向应变随波形的变化规律

图 3-13 和图 3-14 为管径 1.0m 填土 3m 时管顶（对应测点 1）切向应变、轴向应变

随波形的变化关系图。

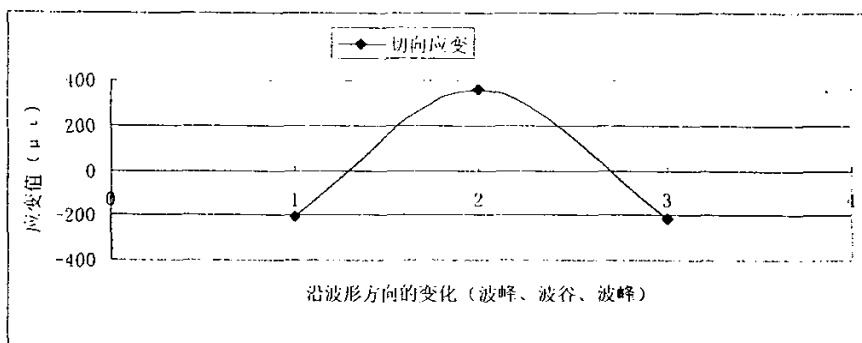


图 3-13 切向应变随波形的变化关系图

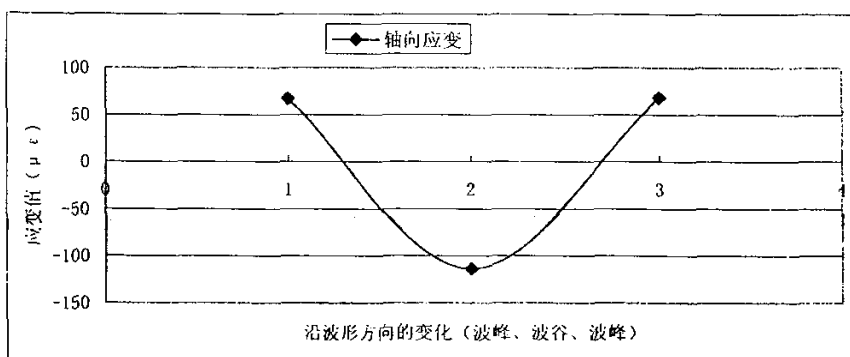


图 3-14 轴向应变随波形的变化关系图

从图中可看出：管顶波峰与波谷处的切向应变与轴向应变的正负号沿着波形方向均呈交替变化。管顶波峰处切向受压，轴向受拉；管顶波谷处切向受拉，轴向受压。在波峰和波谷均存在切向应变大于轴向应变的现象，说明管顶应变以切向应变为主。

### 3. 波峰管顶与管底的竖向相对位移（或称挠度）

各管径波纹管涵波峰管顶与管底的相对位移如图 3-15。

从图中可看出：

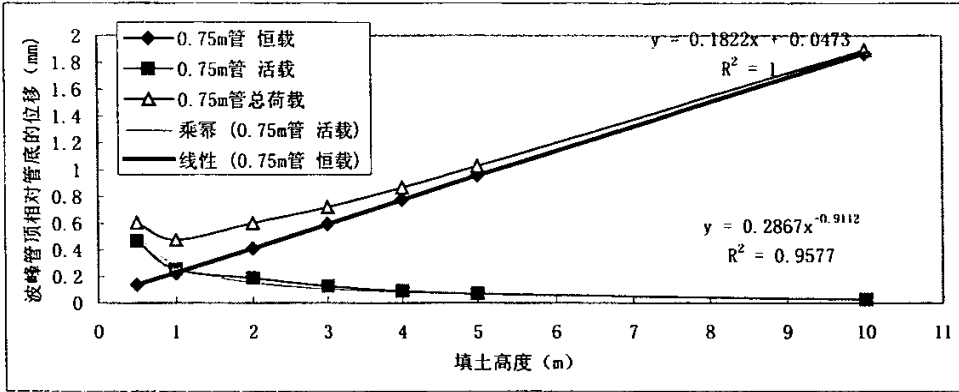
(1) 总荷载（恒载+活载）引起的相对位移可采用公式 (3-17) 表达，在填土 1m 左右出现最小，随后随填土高度的增大而逐渐增大。

$$\Delta u_v^{\text{总}} = \Delta u_y^{\text{恒}} + \Delta u_v^{\text{活}} \quad (3-17)$$

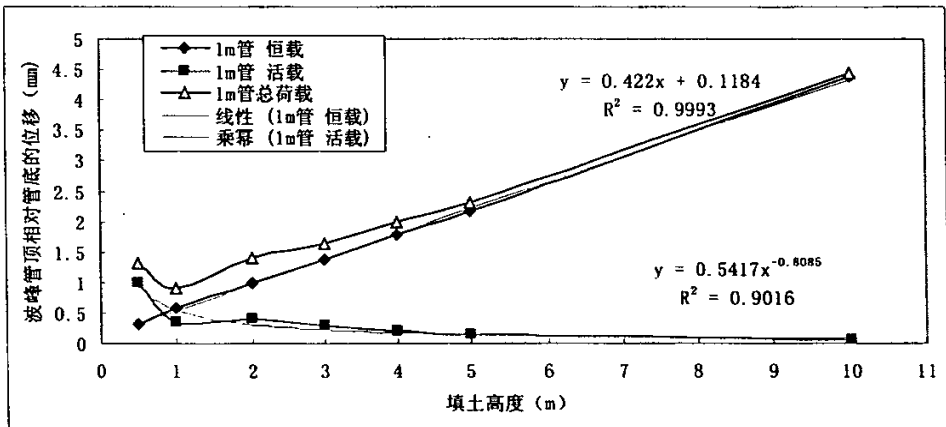
(2) 各管径的管涵恒载（填土自重）下的相对位移随填土高度的增加呈线性增长，线性回归出的结果分别见表 3-4。从表中可看出，回归公式中斜率和截距均随管径的增大而增加，说明管顶填土一定时相对位移（挠度）随管径增大而增大。

(3) 活载（汽—超 20）引起的相对位移增量随着填土高度的增加而急剧减小，有呈乘幂的趋势，回归出的结果分别见表 3-5。从表中可看出，回归公式  $U=A \cdot h^B$  中幂

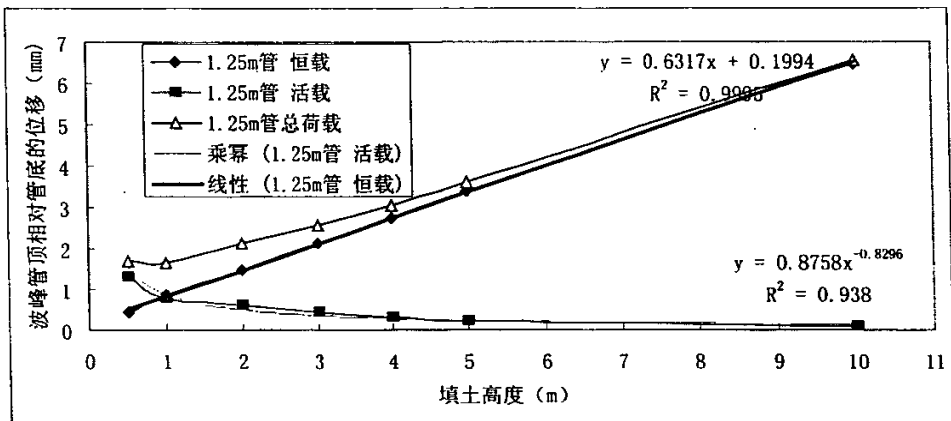
B 相差不大, 但系数 A 随管径的增大而增加, 导致活载引起的相对位移 (挠度) 随管径增大而增大, 如图 3-16 所示。



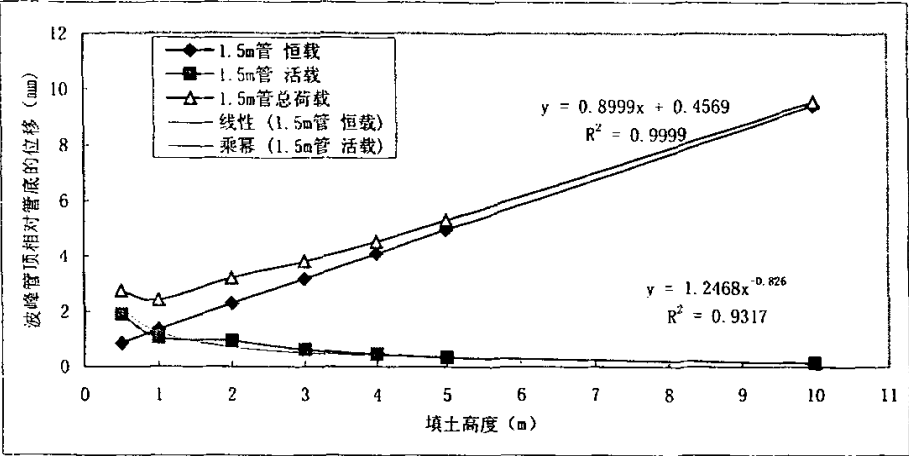
a 0.75 米管涵



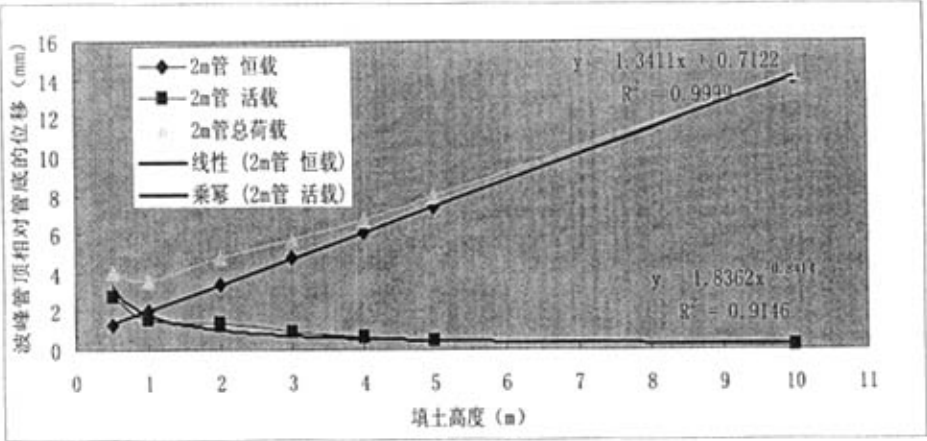
b 1 米管涵



c 1.25 米管涵



d 1.5 米管涵



e 2 米管涵

图 3-15 0.75 米管涵波峰管顶与管底的相对位移

表 3-4 填土自重下的相对位移 (mm)

管径	位移公式	相关系数
0.75m	$\Delta u_y^{\text{恒}} = 0.1822h + 0.0473$	1.0
1.0m	$\Delta u_y^{\text{恒}} = 0.422h + 0.1184$	0.9996
1.25m	$\Delta u_y^{\text{恒}} = 0.6317h + 0.1994$	0.9997
1.5m	$\Delta u_y^{\text{恒}} = 0.8999h + 0.4569$	0.9999
2m	$\Delta u_y^{\text{恒}} = 1.3411h + 0.7211$	0.9999

表 3-5 填土+活载下的相对位移 (mm)

管径	位移公式	相关系数
0.75m	$\Delta u_y^{\text{活}} = 0.2867 h^{-0.9112}$	0.98
1.0m	$\Delta u_y^{\text{活}} = 0.5417 h^{-0.8085}$	0.9495
1.25m	$\Delta u_y^{\text{活}} = 0.8758 h^{-0.8296}$	0.969
1.5m	$\Delta u_y^{\text{活}} = 1.2468 h^{-0.826}$	0.965
2m	$\Delta u_y^{\text{活}} = 1.8362 h^{-0.8411}$	0.956

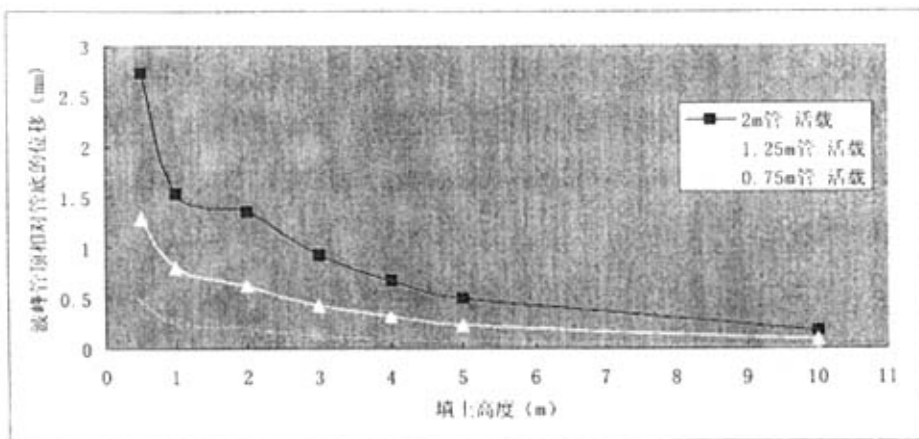


图 3-16 活载引起的波峰管顶与管底的相对位移

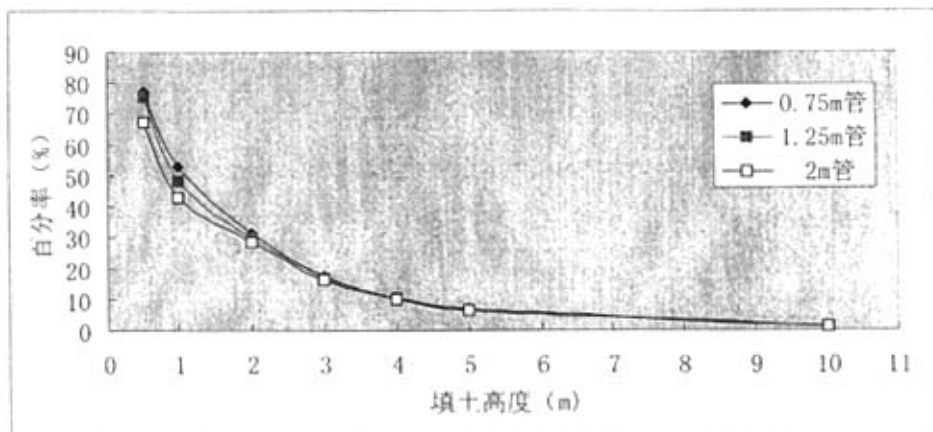


图 3-17 管涵活载引起的相对位移占总位移的百分率

图 3-16 和图 3-17 分别为活载相对位移及其占总位移的百分率。从图中可以看出：活载引起的相对位移除随管径的增加而增加外，随填土高度的增加而减小。各个管径管涵活载引起的相对位移占总位移的百分率呈相同的变化趋势，且随填土高度的增加

逐渐收敛于同一值, 填土 8m 以上时活载位移占总位移的百分率很小 (不到 5%), 此时活载引起的竖向位移可以忽略不计。在管顶填土高度小于 3m 时, 活载引起的位移占总位移的百分率略随管径的大小存在一定的差异, 总体上管径越小, 百分率越大。

#### 4. 最大等效应力

##### (A) 最大等效应力的对应位置

表 3-6~表 3-10 为直径 0.75m、1.0m、1.25m、1.5m、2.0m 钢波纹管涵洞在恒载和管汽一超 20 荷载作用下的最大等效应力及其位置。

直径 0.75m 和 1.0m 管: 在恒载作用下各填土高度最大等效应力的位置均在管底 (测点 10) 波谷处; 在施加汽一超 20 活载后, 填土高度为 0.5m 和 1m 时, 最大等效应力位于管顶 (测点 1) 波谷处, 其余填土高度时最大等效应力均在管底波谷处。这一特征说明管径 0.75m 和 1.0m 管在填土高度为 0.5m 和 1m 时, 汽超 20 级活载对管的应力影响较大, 存在应力集中现象, 随着填土高度的增加, 活载对波纹管的应力影响程度逐渐减小。

表 3-6 直径 0.75m 钢波纹管涵洞的最大等效应力及其位置

0.75m 管恒载 波形 r16 R40 L140H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力	12.551	19.122	33.483	47.503	61.508	75.514	145.55
对应位置	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷
0.75m 管汽超 20 活载 波形 r16 R40 L140H70 t3	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力	52.914	37.054	48.039	57.297	68.574	80.863	147.639
对应位置	管顶波谷	管顶波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷

表 3-7 直径 1.0m 钢波纹管涵洞的最大等效应力及其位置

1.0m 管恒载 波形 r16 R40 L140H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力, MPa	16.646	25.893	42.852	59.174	76.283	92.992	181.725
对应位置	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷
1.0m 管汽超 20 活载 波形 r16 R40 L140H70 t3	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力, MPa	64.473	45.28	60.221	70.802	84.71	99.382	184.282
对应位置	管顶波谷	管顶波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管底波谷

直径 1.25m 管: 在恒载作用下, 填土高度在 0.5m~2m 时, 最大等效应力位于管底波谷处, 填土高度在 3m~10m 时, 最大等效应力位于管侧中部波谷 (以下简称管侧波谷) 处; 在施加汽一超 20 活载后, 填土高度为 0.5m 和 1m 时, 最大等效应力位于管顶波谷处, 其余填土高度时均在管侧波谷处。这一特征说明 1.25m 管也是在填土高度



为 0.5m 和 1m 时, 汽超 20 级活载对管的应力影响较大, 存在应力集中现象。与直径 0.75m 和 1m 管不同的是施加活载填土高度大于 1m 后的最大等效应力在管侧中部。

表 3-8 直径 1.25m 钢波纹管涵洞的最大等效应力及其位置

1.25m 管恒载 波形 r16 R40 L140H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力	15.347	27.31	45.1	62.799	81.22	99.6	191.75
对应位置	管底波谷	管底波谷	管底波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷
1.25m 管汽超 20 活载 波形 r16 R40 L140H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力	63.701	48.131	63.454	75.681	90.513	106.63	194.495
对应位置	管顶波谷	管顶波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷

表 3-9 直径 1.5m 钢波纹管涵洞的最大等效应力及其位置

1.5m 管恒载 波形 R30 r30 L140 H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力 MPa	23.13	32.192	49.765	68.724	87.774	106.93	203.09
对应位置	管底波峰	管底波峰	管底波峰	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷
1.5m 管汽超 20 活载 波形 R30 r30 L140 H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力 MPa	64.982	49.639	69.438	82.045	97.399	114.27	205.96
对应位置	管顶波峰	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷
1.5m 管恒载 波形 R30 r30 L140 H70 t4 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力 MPa						95.349	181.03
对应位置						管侧波谷	管侧波谷
1.5m 管汽超 20 活载 波形 R30 r30 L140 H70 t4 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力 MPa						101.89	183.58
对应位置						管侧波谷	管侧波谷
1.5m 管恒载 波形 R30 r30 L140 H70 t5 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力 MPa						86.227	163.64
对应位置						管侧波谷	管侧波谷
1.5m 管汽超 20 活载 波形 R30 r30 L140 H70 t5 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力 MPa						92.14	165.95
对应位置						管侧波谷	管侧波谷

直径 1.5 米管壁厚 3mm 时, 在恒载作用下, 填土高度在 0.5m~2m 时, 最大等效应力位于管底波峰处, 填土高度在 3m~10m 时, 最大等效应力位于管侧波谷处; 在施加汽超 20 活载后, 填土高度为 0.5m 时, 最大等效应力位于管顶波峰处, 其余填土高度时均在管侧中部波谷处。变化管壁厚度为 4mm 和 5mm 填土 5m 和 10m 时, 在恒载

超 20 活载作用下最大等效应力均位于管侧波谷处。

直径 2 米管，在填土恒载作用下，除 0.5m 和 1.0m 最大等效应力位于测点 7 波谷处外，最大等效应力均位于管侧中部波谷处（对应波谷断面测点 5 偏下位置），在施加汽一超 20 活载后，最大等效应力在填土高度为 0.5m 时位于管顶波谷处，其余填土高度时均在管侧中部波谷处。这一特征说明管径 2m 管在填土高度较大时，管侧波谷处存在最大的应力集中。

表 3-10 直径 2.0m 钢波纹管涵洞的最大等效应力及其位置

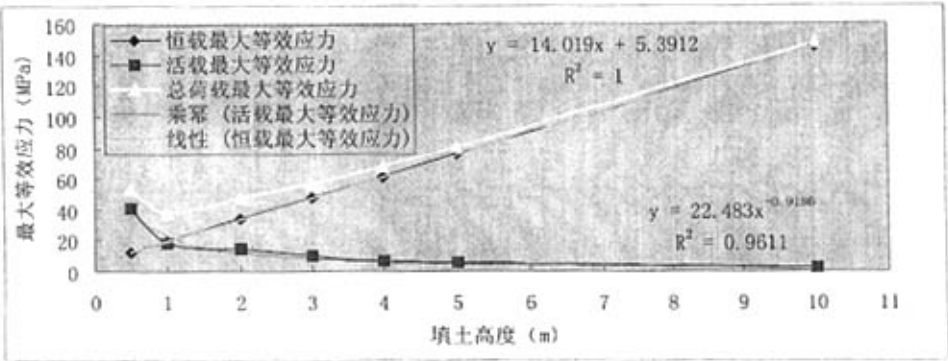
2.0m 管恒载 波形 r16 R40 L140H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力	22.866	31.315	48.818	66.688	84.69	102.79	193.86
对应位置	测点 7 波谷	测点 7 波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷
2.0m 管汽超 20 活载 波形 r16 R40 L140H70 t3 mm	填土高度, m						
	0.5	1	2	3	4	5	10
最大等效应力	78.342	44.264	66.999	79.276	93.77	109.743	196.27
对应位置	管顶波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷	管侧波谷

计算结果表明在管顶、管底、管侧波峰和波谷均为应力集中处，其值相差不大，以上分析只是取其最大值。

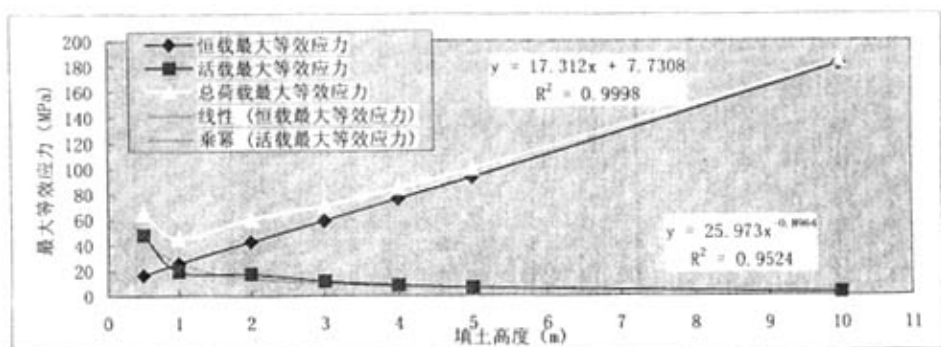
(B) 最大等效应力与管径填土高度的关系

图 3-18 为 0.75m~2.0m 管涵的恒载、活载和总荷载最大等效应力随填土高度的变化图。从图中可看出：各管径的最大等效应力随填土高度的增加呈现出相同的变化趋势和波峰管顶与管底的竖向相对位移的变化趋势极为相似。各管径时总荷载的最大均等效应力在填土高度 1 米左右出现最小值，随后随填土高度的增加而逐渐增加。

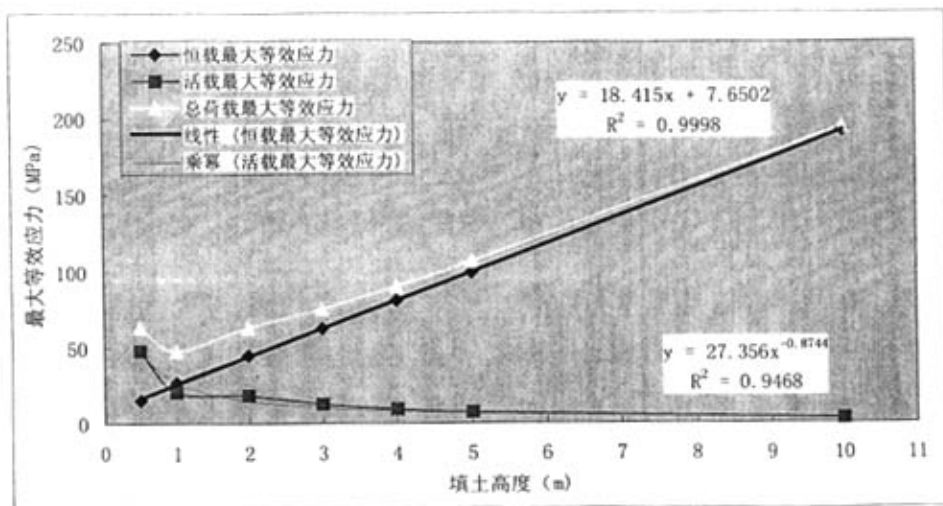
恒载（填土自重）作用下的最大等效应力均随填土高度的增加呈线性增长趋势，活载（汽一超 20 级荷载）引起的最大等效应力均随填土高度的增加而逐渐减小，统计结果分别见表 3-11 和表 3-12，相应地也可分别采用线性和乘幂回归。



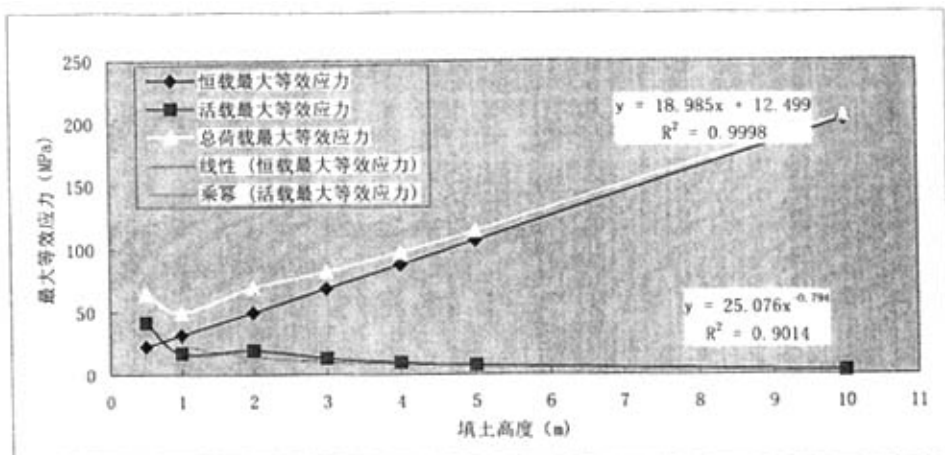
a 0.75 米管涵



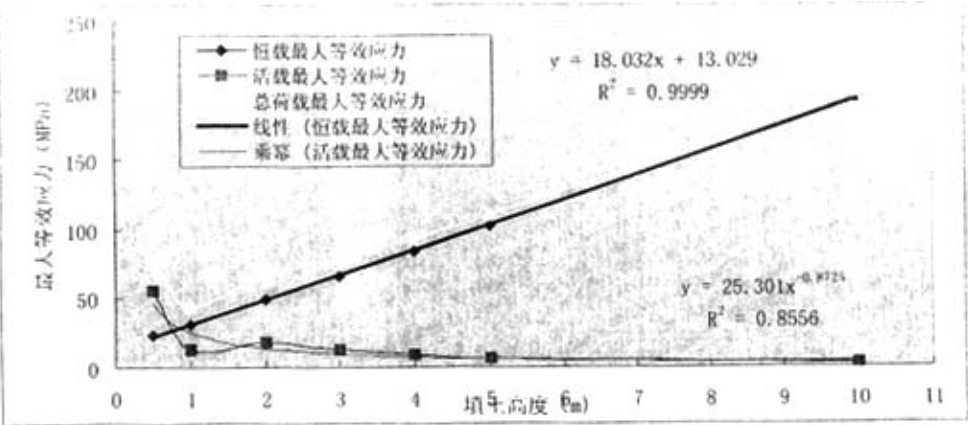
b 1.0 米管涵



c 1.25 米管涵



d 1.5 米管涵



e 2 米管涵

图 3-18 管涵的最大等效应力

表 3-11 恒载作用下的最大等效应力

管径	最大等效应力	相关系数
0.75m	$\sigma_{\max}^{\text{恒}} = 14.019h + 5.3912$	1.0
1m	$\sigma_{\max}^{\text{恒}} = 17.312h + 7.7308$	0.9999
1.25m	$\sigma_{\max}^{\text{恒}} = 18.415h + 7.6502$	0.9999
1.5m	$\sigma_{\max}^{\text{恒}} = 18.985h + 12.499$	0.9999
2m	$\sigma_{\max}^{\text{恒}} = 18.032h + 13.029$	0.9999

表 3-12 汽-超 20 活载作用下的最大等效应力

管径	最大等效应力	相关系数
0.75m	$\sigma_{\max}^{\text{活}} = 22.483h^{-0.9186}$	0.98
1m	$\sigma_{\max}^{\text{活}} = 25.973h^{-0.8964}$	0.9759
1.25m	$\sigma_{\max}^{\text{活}} = 27.356h^{-0.8744}$	0.973
1.5m	$\sigma_{\max}^{\text{活}} = 25.076h^{-0.794}$	0.9494
2m	$\sigma_{\max}^{\text{活}} = 25.301h^{-0.8725}$	0.925

总荷载（恒载+活载）作用下的最大等效应力可用公式（3-18）计算。尽管最大等效应力的位置在不同管径不同填土高度上存在某些差异，但用公式（3-18）计算偏保守。

$$\sigma_{\max}^{\text{总}} = \sigma_{\max}^{\text{恒}} + \sigma_{\max}^{\text{活}} \tag{3-18}$$

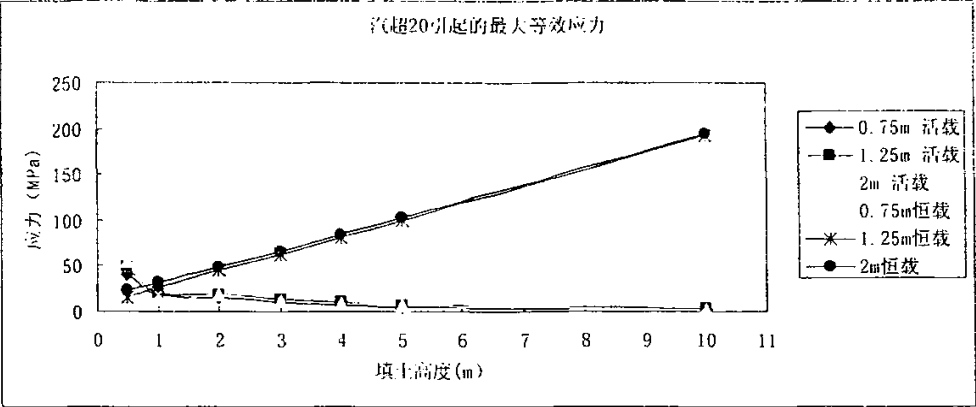


图 3-19 各管径管涵恒载与活载最大等效应力对比

图 3-19 为各管径管涵恒载与汽-超 20 活载最大等效应力对比图。从图中可看出：

- (1) 最大等效应力总体上随管径的增加而增加；
- (2) 恒载最大等效应力：0.75 米管的相对较小，1.25 米和 2 米的值相差不大，但均大于 0.75 米管的值；
- (3) 活载引起的最大等效应力：管径 0.75~2 米的值在不同填土高度时差异不大，填土高度小于 1~2 米与恒载引起的最大等效应力相比不可忽略，在填土高度大于 8 米以后均较小，相对于恒载下的值可以忽略不计，也就是说当填土高度大于 8 米以后可以不考虑活载引起的应力，仅考虑恒载下的应力，而不致引起大的偏差。

3.4.2 不同壁厚对波纹管涵受力的影响

对管径 1.5 米（波形为 r30 R30 L140 H70）不同壁厚的波纹管涵分别进行计算最大等效应力，分析的结果对比如表 3-13 所示。其中恒载为填土作用，活载为汽超 20 级。

表 3-13 不同壁厚波纹管涵的最大等效应力对比 MPa

填土高度 (m)	壁厚 3mm		壁厚 4mm		壁厚 5mm		壁厚 6mm		壁厚 7mm	
	恒载	活载	恒载	活载	恒载	活载	恒载	活载	恒载	活载
0.5	23.13	64.982								
1	32.192	49.639								
2	49.765	69.438								
3	68.724	82.045								
4	87.774	97.399								
5	106.93	114.27	95.349	101.89	86.227	92.14				
10	203.09	205.96	181.03	183.58	163.64	165.95	147.78	149.86	134.03	135.92

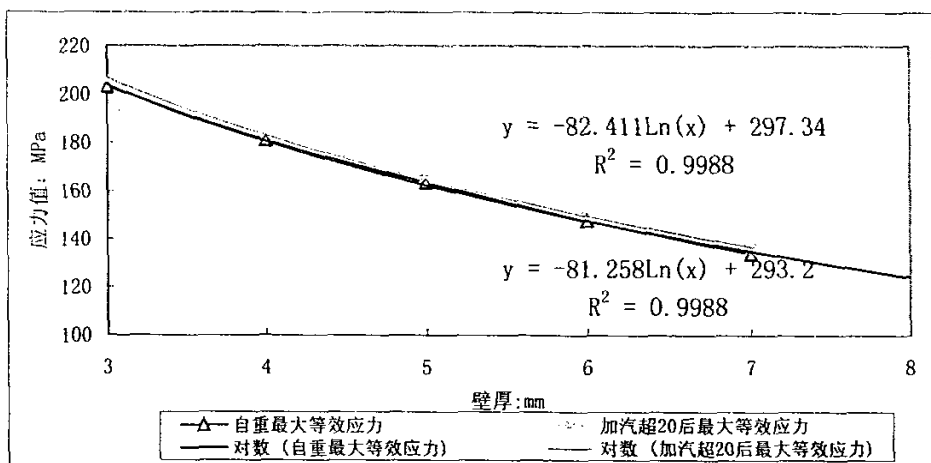


图 3-20 填土 10 米时最大等效应力与壁厚的关系

从计算结果可知：随着波纹管的壁厚增加，最大等效应力相应减小。

图 3-20 为填土高度 10 米时最大等效应力与壁厚的关系图（图中自重指填土荷载），从该图可得出，当管顶填土高度为 10 米时，恒载引起的最大等效应力与壁厚  $t$  呈对数关系，如公式 (3-19) 所示。

$$\sigma_{\text{恒}} = -81.258 \ln(t) + 293.2 \quad (3-19)$$

施加汽超-20 荷载后最大等效应力与壁厚呈公式 (3-20) 所示的对数关系。

$$\sigma_{\text{活}} = -82.411 \ln(t) + 297.34 \quad (3-20)$$

### 3.4.3 不同活载对波纹管涵受力的影响

图 3-21 为 1.5 米管（波形为 r30 R30 L140 H70 壁厚为 3~6mm）在施加不同荷载前后的最大等效应力对比图。

从图中可看出：

(1) 管底填土高度为 10 米时，填土土压力、汽一超 20 和挂车—120 作用下等效应力均明显大于填土 5 米时的各项值。

(2) 同一壁厚与填土高度不同荷载引起的等效应力值由大到小顺序依次为：挂—120 > 汽一超 20 > 填土土压力，但挂车—120 与汽一超 20 之间的差值不大，约在 5% 左右。

(3) 填土高度越大，施加挂车—120 活载与汽一超 20 级活载后的最大等效应力之间的差值越小，说明填土高度越大活载对波纹管涵的受力影响越小。

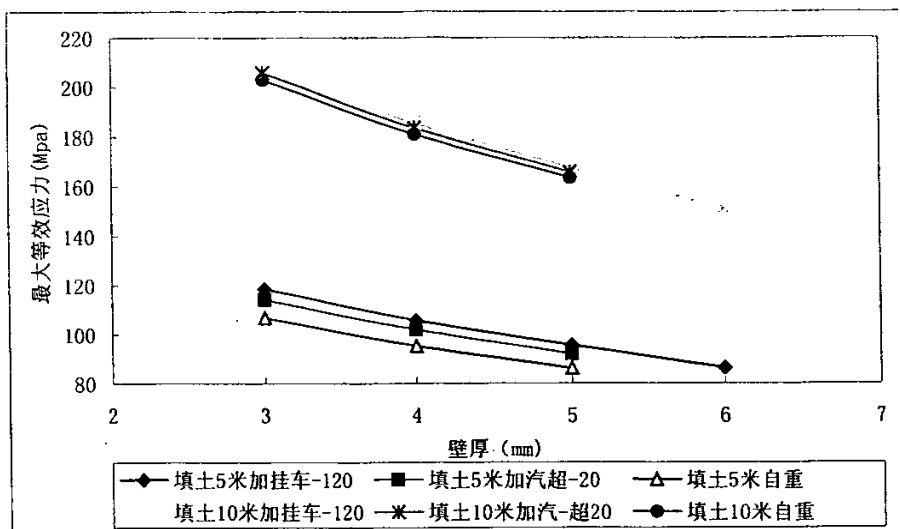


图 3-21 施加不同荷载前后的最大等效应力

### 3.4.4 不同波形对波纹管涵受力特征的影响

为了分析波形对波纹管涵受力特征的影响，选取管径 1.5m 波纹管两种波形分别计算，进行对照分析（如图 3-22 和图 3-23 所示），其中：大波形为 R30 r30 L140 H70mm，壁厚分别为 3~6mm；小波形为 R30 r30 L75 H25mm（国外波形），壁厚分别为 2.77mm；管顶填土 10m，活载均为挂 120 级。

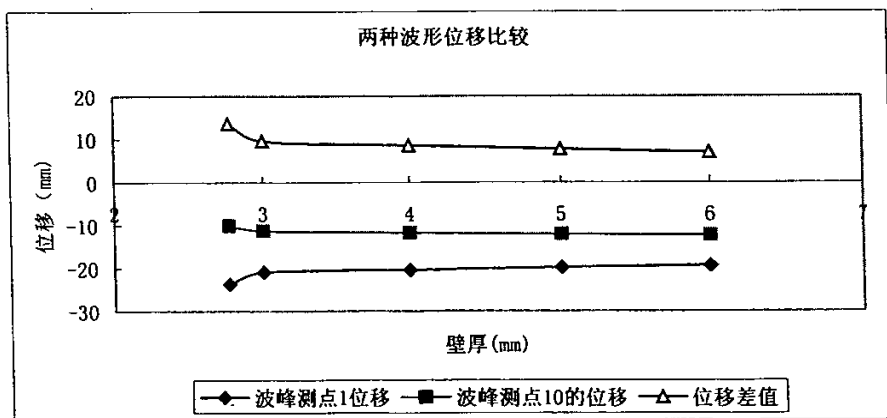


图 3-22 两种波形的竖向位移对比

从图中可看出：

(1) 波形对波纹管的受力影响较大，小波形的最大等效应力显著小于大波形的最大等效应力，说明小波形的刚度小、应力分布均匀。

(2) 国外小波形的竖向位移在管底波峰小而在管顶波峰大，说明挠度较大，过大

的位移差将引起波纹管过大的弯曲变形和失稳，亦可导致波纹管破坏而丧失抵抗变形的能力。

对国内市场两种大波形 R30、r30、L140、H70（简称波形 A）与 R40、r16、L140、H70（简称波形 B），管径为 1.5m、管顶填土高度 3.0m 时进行计算，结果比较见表 3-14。

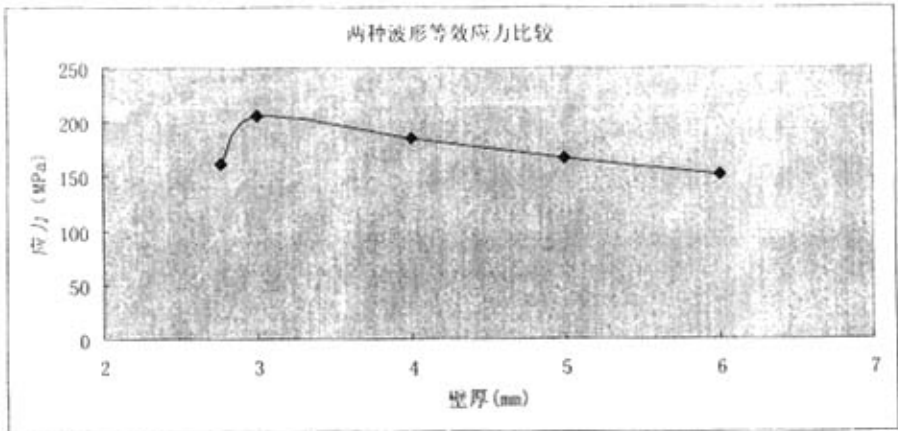


图 3-23 两种波形的最大等效应力对比

波形 A 的管顶与管底波峰的竖向相对位移小于波形 B，说明其抗弯性能优于波形 B；但其最大等效应力大于波形 B，说明材料利用系数高于波形 B，主要由于波形 A 的回转半径大于波形 B。总体上，二者的竖向相对位移和最大等效应力误差较小，均小于 3%。

表 3-14 两种大波形竖向相对位移和最大等效应力

波形	竖向相对位移 mm			最大等效应力 MPa		
	恒载作用	活载作用	总位移	恒载作用	活载作用	总应力
波形 A	3.1788	0.6251	3.8039	68.724	13.321	82.045
波形 B	3.179	0.641	3.82	66.937	13.285	80.222
A—B	-0.0002	-0.0159	-0.0161	1.787	0.036	1.823
(A-B)/A (%)	-0.00629	-2.54359	-0.42325	2.600256	0.27025	2.221951

3.4.5 波纹管涵与圆管涵在受力上的差异

将同管径 2m 的波纹管涵（波形为 r16 R40 L140 H70 壁厚为 3mm）与圆管涵(壁厚 3mm)分别建立有限元模型，施以同样荷载（填土土压力和汽一超 20 级活载）分别计算，对比结果如表 3-15 所示。表中的竖向相对位移为管顶波峰相对于管底波峰的竖向位移。从表中可看出波纹管涵的挠度明显小于圆管涵的挠度。



表 3-15 波纹管涵与圆管涵的对比

填土高度与荷载 管涵类型与对比项		填土高度 0.5 米		填土高度 10 米	
		填土恒载	汽—超 20 活载	填土恒载	汽—超 20 活载
竖向相对 位移 (mm)	圆管涵	2.099	7.724	21.309	21.332
	波纹管涵	1.3164	4.047	14.095	14.2725

在活载作用下，沿管涵轴线方向会出现不均匀的竖向位移，当填土高度较小时尤甚，若用波纹管涵，挠度较小，由于其沿轴线方向延伸性能远高于圆管涵，竖向挠度不会引起过大的轴向应变，若用圆管涵则与之相反，将会导致较大的轴向应变。故波纹管涵抗不均匀沉降的能力亦远大于圆管涵。

### 3.4.6 波纹管涵与圆管涵在地基沉降后的差异

对管径 1.5m、管顶填土 3.0m、壁厚 5mm 的波纹管（波形 h70,L140,R30,r30）和圆管涵洞分别在基底（基础填砂砾厚 3.0m）施加 0~10cm 垂直位移（沉降）进行应力和应变有限元分析，模型尺寸：路线方向长 16m，路基顶宽 7.0m，高共 7.5m，边坡高 4.5m，边坡坡率 1：1.5，对波纹管模型仅在路中 4 个波形内采用波纹管，路中 4 个波形以外采用圆管代替（假设代替后的影响较小，在小沉降 2~5cm 范围内与实际相近，大沉降量时仅作定性比较），沉降采用路中 4 个波形下侧地基下沉 0~10cm，图 3-24~3-25 为本有限元计算采用的模型图，分析结果如下。

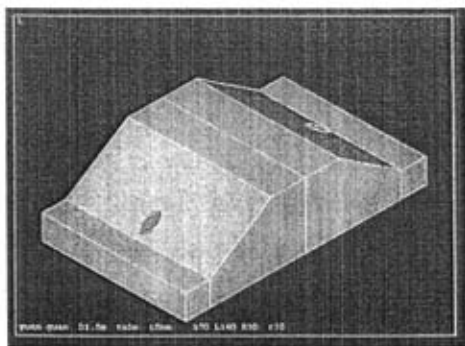


图 3-24 整体模型

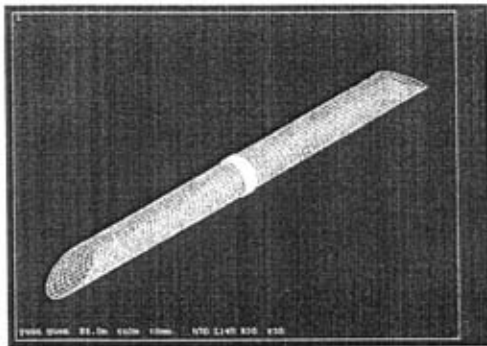


图 3-25 管涵模型

#### 1. 管侧水平位移

圆管受地基沉降因素的影响比波纹管要大得多（图 3-26），尤其表现在位移响应上。由图 4-28 可看出：对于不同地基沉降下的管侧水平位移，整体上圆管都比波纹管要大得多，在地基沉降 1~5cm 范围内，波纹管的管侧位移变化幅度很小，仅为 2mm，而圆管的则达到 4mm，是波纹管的两倍。

在系统荷载作用下，对圆管不论地基沉降量大小管侧水平位移方向不变，而对波纹管管侧水平位移在地基沉降 3.5~4cm 时存在方向发生改变的现象。

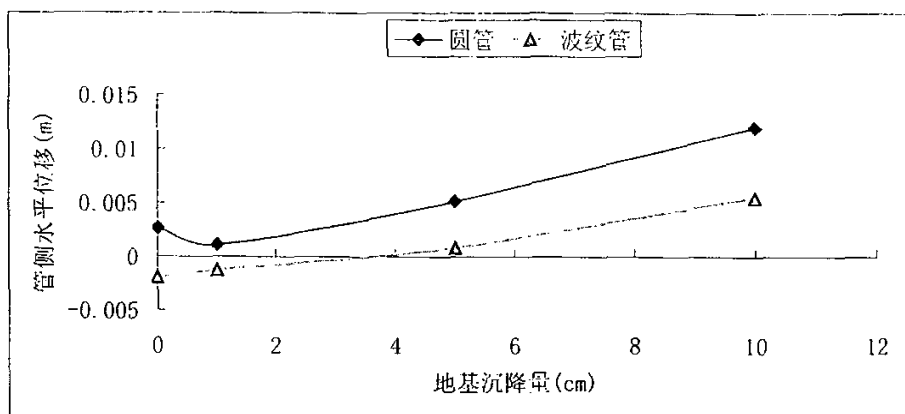


图 3-26 圆管与波纹管的管侧水平位移

## 2. 管顶相对管底的竖向位移（挠度）

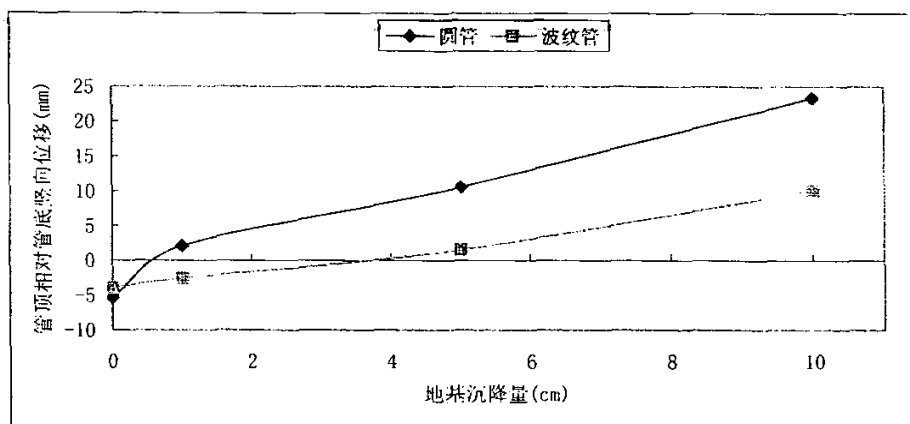


图 3-27 圆管与波纹管的管顶相对管底的竖向挠度

图 3-27 是圆管与波纹管的管顶相对管底的竖向位移，由图中可看出：对于不同地基沉降下的管顶相对管底的竖向位移，圆管比波纹管的波动性也要大得多，而波纹管的变化更趋于平缓。在 0~5cm 地基沉降范围内，波纹管的管顶相对管底的位移变化幅度仅为 5mm 左右，而圆管的高达 16mm 左右，是波纹管波动幅度的 3 倍多。

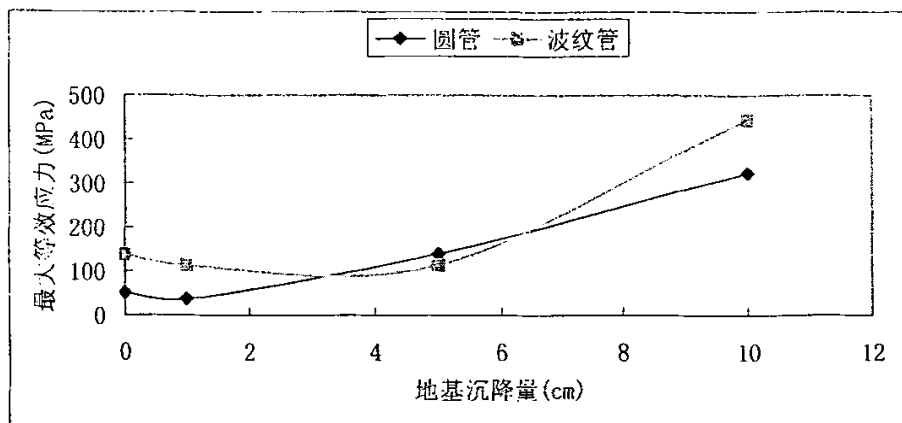
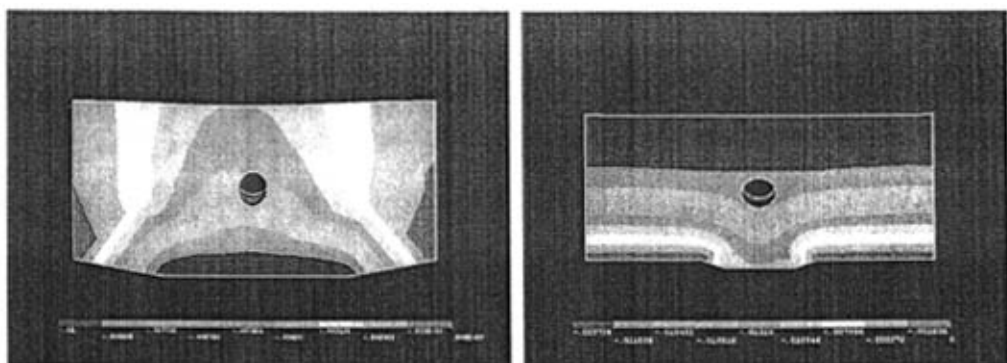


图 3-28 圆管与波纹管的最大等效应力

### 3. 最大等效应力

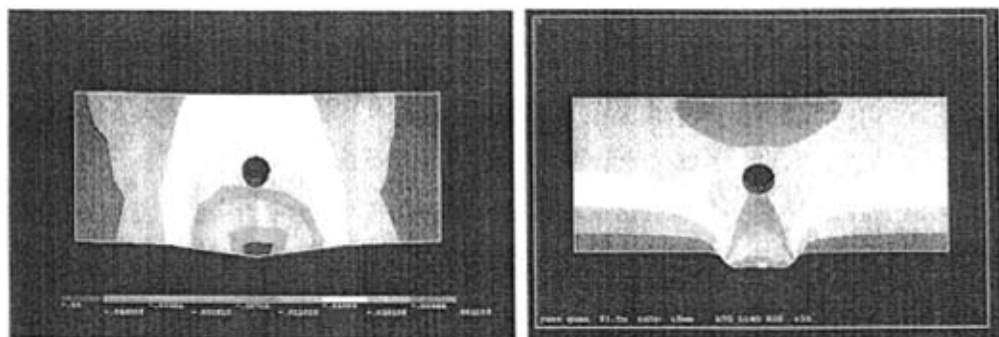
图 3-28 是圆管与波纹管的最大等效应力对比图，由图中可看出：相同荷载下的最大等效应力波纹管的值在整体上要比圆管的大，但波纹管在地基沉降 0~5cm 范围内的应力变化幅度较小，仅为 23.63Mpa，而圆管的达 88.88Mpa，是波纹管的 3.76 倍。



a. 圆管

b. 波纹管

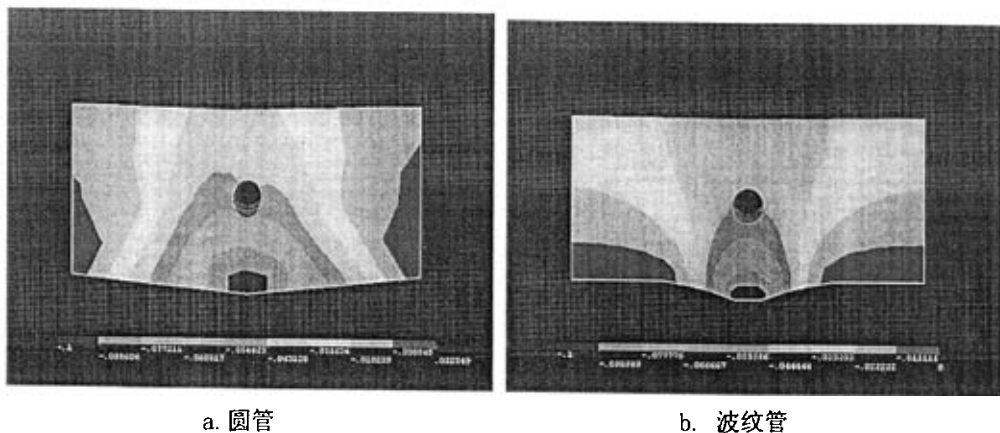
图 3-29 地基沉降 1cm 时道路断面竖向位移云图



a. 圆管

b. 波纹管

图 3-30 地基沉降 5cm 时道路断面竖向位移云图



a. 圆管

b. 波纹管

图 3-31 地基沉降 10cm 时道路断面竖向位移云图

图 3-29~图 3-31 分别为采用圆管涵和波纹管涵时不同地基沉降下的道路断面竖向位移云图。从图中可看出：采用圆管涵时地基沉降因素对道路断面的竖向位移影响较大，表现在断面位移变化梯度较大，在道路路面上的反映较大；而采用波纹管涵时则相对较小。说明地基沉降时采用波纹管涵比采用圆管涵有利于降低路面内部应力。

### 3.5 本章小结

1. 钢波纹管（板）结构是一种典型的旋转壳，可以用薄壳中旋转对称壳理论分析，工程计算法、解析法均不适用竖向受力的涵洞工程，数值法成为钢波纹管涵洞研究的主要工具。

2. 钢波纹管涵洞大应变分析与小应变分析的结果非常接近，本文边界条件②与反开槽回填法施工工艺结合较好，精度满足要求。

3. 通过有限元分析，首次得到钢波纹管涵洞力学性能的如下系列规律：

(1) 管内切向与轴向应力应变以及挠度和最大等效应力在恒载作用时随填土高度的增加有呈线性增长的规律，活载作用时随填土高度的增加逐渐减小；总体上切向应力应变最大值大于轴向最大值；管顶以切向应变为主。

(2) 各管径恒载、活载作用下管侧波峰切向和轴向均受拉；在管顶波峰和管底波谷以及管侧波谷均出现切向受拉、轴向受压或切向受压、轴向受拉互补的变化规律；每一测点恒载下切向应变较大时，轴向应变则相对较小。

(3) 管顶波峰与波谷处切向与轴向应力应变随波形呈拉压交替的变化规律。

(4) 波峰和波谷在管顶、管底、管侧均为应力集中处，各管径最大等效应力的

位置与荷载密切相关；最大等效应力总体上随管径的增加而增加；随着波纹管涵的壁厚增加，最大等效应力呈对数减小；汽—超 20 与挂车—120 之间的差值约在 5%左右。

(5) 波形差异较大时其最大等效应力和挠度相差较大，小波形的应力分布均匀。

(6) 与圆管涵相比，波纹管涵的管侧水平位移、挠度和对道路的扰动小，有利于保护路面。

## 第四章 公路钢波纹管涵洞的应用效果和适应条件

### 4.1 钢波纹管涵洞的应用效果

#### 4.1.1 青藏公路钢波纹管涵洞的应用效果

为减少涵洞工程病害,提高涵洞工程在多年冻土地地区的使用寿命,改善青藏公路多年冻土地地区路基横向排水条件,根据青藏公路科研任务,结合整治工程实施状况,1997年在 K3278+200 与 K3280+915 处各修建波纹管涵一道,作为试验工程。1998年9月又在 K3263+094 修建波纹管涵一道作为对比研究。

波纹管涵设计孔径为 1.50m,考虑到如果发生冻胀或不均匀的沉降变形而产生附加应力,以及运输及施工过程中的不均匀受力,设计壁厚 3mm,波高 7cm,波距 14cm。涵管为整体式或拼装式,进出口形式为削头抛石护坡或不设,基础采用砂砾换填,换填厚度 1.0~1.2 米。

K3278+200 和 K3280+915 为整体式波纹管试验涵,地处青藏公路唐古拉山的老温泉兵站附近,海拔 4700~4850m 左右,年平均气温 -4.2~-5.6℃,年平均地温 0.5~-1.0℃,地质构造为弧形断裂等晚近构造。原路基稍有沉降,路面微弱变形,原设计为钢筋混凝土盖板涵,涵底纵坡为 1%。K3278+200 涵下为多冰冻土,融沉系数 2~6%,土质沿深度依次为砾砂、亚粘土夹砾石、角砾土、碎石土、泥岩强风化;K3280+915 涵下为融区,地下水丰富,土质沿深度依次为碎石土、角砾土、亚粘土夹砾石、泥岩强风化。

K3278+200 和 K3280+915 试验涵基础砂砾材料的主要技术指标为:视比重 2.55g/cm<sup>3</sup>,堆积密度 1.46g/cm<sup>3</sup>,含泥量 3.05%,含水率 3.2%,针片状颗粒含量 21.9%,压碎值 8.1%,最大干密度 2.25g/cm<sup>3</sup>,无超过 50mm 的颗粒。施工中碾压采用 15 吨振动式压路机,现场测定的压实度均达到 85%以上。

K3278+200 和 K3280+915 两个试验涵洞洞口主体构件由厂家制造,并与涵身由螺栓紧密联接。在 K3278+200 涵洞进水口修筑了 2.5m 长的双层干砌片石铺砌,出水口修筑了 18m 长的双层干砌片石铺砌和铅丝笼截水墙。为防止路基土堵塞涵洞,分别在进出水口设置了铅丝笼一字墙。而 K3280+915 涵洞只在进出口的洞口与河床接头处修筑了双层干砌片石铺砌。在采取上述技术措施后,以 1997 年 9 月份调查的使用状况看,尚未出现异常现象,能满足该处路基横向排水的要求。

K3263+094 为两半圆上下拼装式波纹管试验涵,地处青藏公路老温泉兵站~雁石

坪地段布曲河谷阶地,海拔 4700m 左右,年平均气温 $-4.2\sim-5.0^{\circ}\text{C}$ ,年平均地温 $0\sim-1.0^{\circ}\text{C}$ ,冻土类型为含土冰层,地下冰分布不均,有厚层地下冰存在,地质构造为亚扭性断裂。涵洞地面高程 4757.940m,地面下 0~1.5m 为卵石土,1.5~3m 为亚粘土,3.5~4.5m 为圆砾,4.5~6.2m 为强风化泥岩,融沉系数 32~40%,属特强融沉、强冻胀类。原路基间断沉降 10~45cm,路面有网裂。原设计为钢筋混凝土盖板涵,涵底纵坡为 1%。

K3263+094 试验涵洞口只作简单处理,不另做调治构筑物,达到路基横向排水的要求。

2003 年 6~7 月,对 1997~1998 年修筑的青藏公路三道试验涵洞的使用状况进行了重点调查,发现:

- (1) 三道试验涵洞无明显沉降,车行无跳车现象;
- (2) 涵洞进出口水流正常,也无明显的进出口沉降现象;
- (3) 涵身无不均匀沉降现象;
- (4) 无明显腐蚀(采用镀锌防腐技术,未涂沥青)。

#### 4.1.2 青藏铁路钢波纹管涵洞的应用效果

2003 年 7 月,对 2001 年修筑的青藏铁路两道试验涵的使用情况进行了调研,发现:

- (1) 涵洞使用正常,DK856+262 涵洞在火车荷载(57.5KPa 均布荷载)下,管顶波峰最大挠度 5.5mm,DK857+973 涵洞在火车荷载(57.5KPa 均布)下,管顶波峰最大挠度 5.8mm;
- (2) 涵洞进出口局部有富锌涂层的剥离现象,可能由于施工中的局部受力或引起,说明富锌涂层的防腐性能相对镀锌防腐技术稍差;管身处无明显腐蚀现象;
- (3) 涵身无不均匀沉降现象;
- (4) 进出口无明显的沉降现象。

#### 4.1.3 国道 G214 青海段钢波纹管涵洞的应用效果

青康公路(国道 214 线)姜(路岭)清(水河)段,全长 291km,地处青藏高原腹地,需翻越姜路岭、长石头山、查拉坪和巴颜喀拉山,平均海拔 4300m,路线最高点海拔 4824m,年平均气温 $-4.2^{\circ}\text{C}$ ,极端最低气温 $-48.0^{\circ}\text{C}$ ,全年冰冻期在 180 天以上。1999 年 7 月,青海省公路科研勘测设计院在对 G214 线姜清段的勘察设计时,发现多

年冻土与融区相间分布在该路段，冻土温度高，属典型的退化性多年冻土。原有涵洞因冻胀和融沉双向反复作用或因基础埋置过浅导致涵洞铺砌破损、翼墙倾覆、涵台开裂、洞身裂缝、错台等破坏。

表 6-2 青海省钢波纹管涵应用情况

公路 名称	波纹管 管径 cm	总 长 m	数 量 道
G214 线姜清段	150	2018.94	122
	200	87.34	4
	250	43.74	2
二尕公路	150	989.45	49
	200	1395.06	57
	250	382.1	11
西久公路大至久段	150	1236.0	64
	200	738.65	32
	250	258.19	9
花达公路	150	601.14	34
	200	480.58	34

为克服因冻融导致涵洞过早的破坏，青海省在 2000 年实施的 G214 线姜清段工程中试用了  $\Phi 150\text{cm}$ （内径）的钢质镀锌波纹管，取得成功。于 2001 年、2002 年推广到西（宁）久（治）公路大（武）至久（治）段、花（石峡）至达（日）公路、二（指哈拉山）至尕（海）等公路建设中，至 2003 年 12 月四个公路项目已累计使用波纹管涵洞 8231.19m/418 道（详见表 6-2），直径从 150cm 扩大至 250cm，涵洞顶填土高度由 100cm 增加到 1700cm，波纹管壁厚由 3mm 增加到 5mm。

青海省公路开发建设中心 2000 年开始应用波纹管涵洞，主要采用直径 1.5m、直径 2.0m、直径 2.5m 涵管，进出口端部边坡采用干砌片石防冲刷处理。应用中发现以下问题：（1）回填砂砾基础 1.0m 时，管侧压实过程中管易发生滚动；（2）法兰和螺栓有时存在不对应的现象。应用过程中未发现管口下沉现象。

#### 4.1.4 黑龙江钢波纹管涵洞的应用状况

大兴安岭加漠公路是黑龙江省北部边陲地方网公路，是联结加格达奇、漠河的唯一通道，是国防公路，也是地方经济、运输的主干线，全长 600 余公里，于 2002 年开工，2003 年 10 月完成，总投资 3.0 亿人民币。该段公路不良地质主要为多年冻土，部分为湿地，涵洞工程的病害主要为涵洞基础下多年冻土退化而引起失稳。旧路涵洞以



圆管涵为主，部分为盖板涵，于 20 世纪 80 年代旧路改造时修建，主要有以下几个方面的问题：①涵洞整体或局部下陷，已经失去排水功能；②涵洞在荷载作用下破损严重；③洞口八字墙倒坍、倾斜。

为解决大兴安岭多年冻土地地区涵洞基础稳定性问题，黑龙江省公路局及加漠公路建设指挥部决定采用波纹管涵洞，以适应因多年冻土退化而引起的变形和沉降。该路段范围内共修建了 100 余道波纹管涵洞，基础不换填。使用 1 年后，对波纹管涵洞进行了全面调查，除极少部分因施工原因、基础处理不当、防水处理不当发生不均匀沉降变形，涵身有积水和渗水现象外，大部分波纹管涵洞使用状态良好。目前尚未发现因构造原因产生的损坏。从该路的使用看，波纹管涵具有以下几方面的优点，可在东北多年冻土地地区推广使用：（1）适用基础条件较广，适应变形能力强；（2）施工简便，速度快，适合寒冷地区施工季节短的特点；（3）洞口处理方便，可不需要八字墙、端墙。该段波纹管涵洞的主要尺寸：孔径  $\Phi 1.0\text{m}$ ，镀锌板厚  $1\sim 2.5\text{mm}$ ，波距  $68\text{mm}$ ，波高  $13\text{mm}$ 。

#### 4.1.5 上海钢波纹板涵洞（通道）的应用状况

上海四号线莘朱公路新开河波纹板试验涵，1998 年施工涵洞跨径 4.0 米，圆形，涵长 38~50 米。该涵洞采用波纹板拼装而成，板与板之间靠螺栓和螺母的连接承受剪应力，管材和连接螺栓、螺母全部采用热浸镀锌防腐处理且镀锌层厚度达  $80\mu\text{m}$ 。2001 年 8 月调查涵内长期有水，但无任何锈蚀现象，说明采用热浸镀锌防腐处理完全能适应上海等沿海城市钢波纹板涵洞的使用需求。

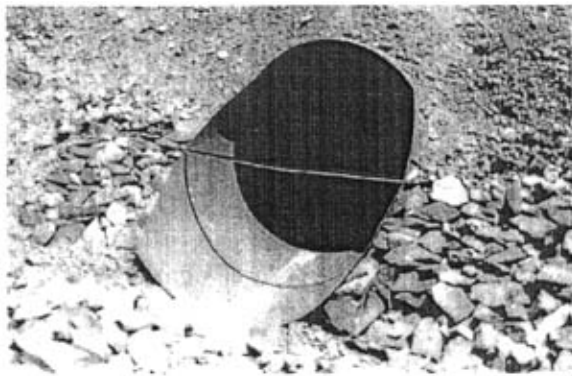


图 4-1 青藏公路 K3278+915 涵使用一年后的情况



图 4-2 青藏公路 K3280+200 涵使用一年后的情况



图 4-3 青藏公路 K3278+915 涵 2003 年的情况

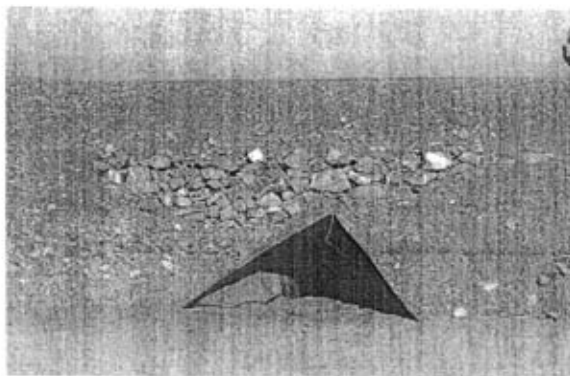


图 4-4 青藏公路 K3280+200 涵 2003 年的情况

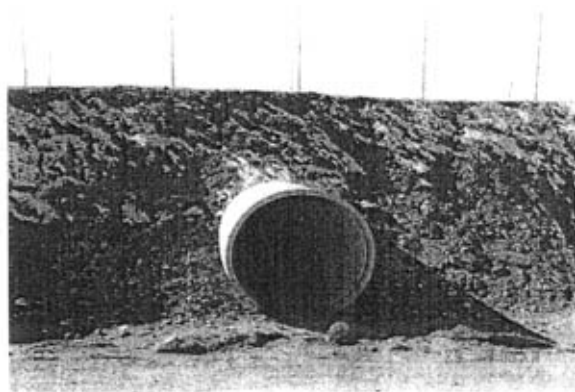


图 4-5 青藏公路 2003 年推广应用涵洞



图 4-6 青藏铁路 DK857+973 试验涵

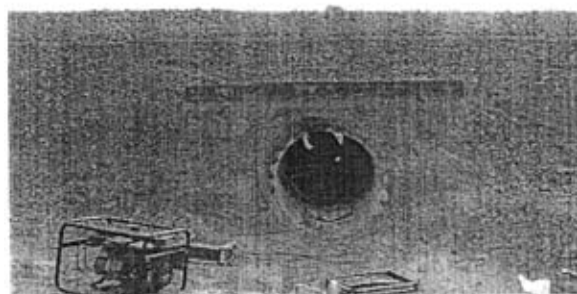


图 4-7 青藏铁路 DK856+262 试验涵

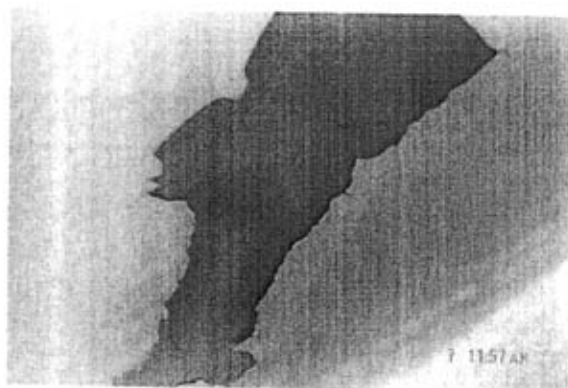


图 4-8 青藏铁路 DK856 试验涵不均匀受力导致的防腐层（富锌漆）脱落

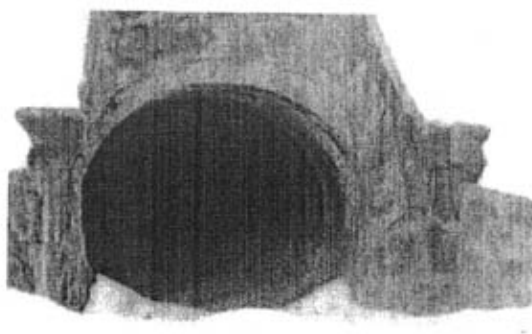


图 4-9 黑龙江加漠公路波纹管涵进口

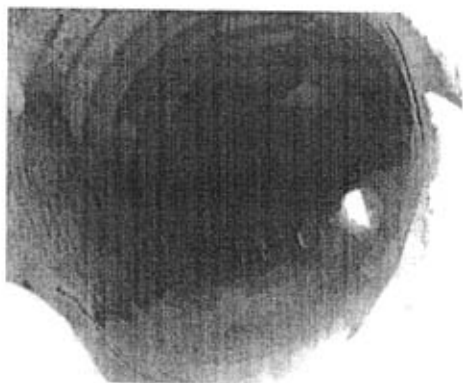


图 4-10 黑龙江加漠公路波纹管涵进口

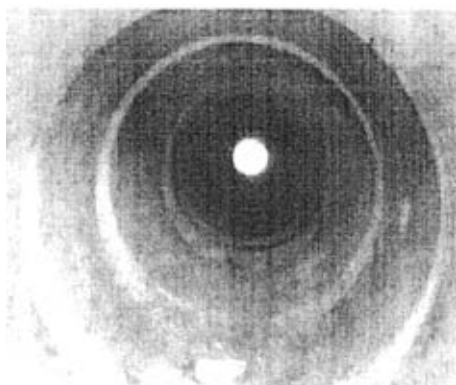


图 4-11 黑龙江加漠公路波纹管涵涵身

## 4.2 公路钢波纹管涵洞的适应范围

从国外钢波纹管涵洞的应用及防腐调研情况看，钢波纹管涵洞具有较强的适应能力，经过防腐处理后的钢波纹管涵洞完全能够使用 50 年（详见第 5 章）。综合分析现有国内防腐技术，虽然距离国外防腐技术存在一定差距，但采用表 5-16 推荐的防腐方案后的钢波纹管涵洞的寿命应达到 20~30 年。如果考虑钢波纹管涵洞防腐的养护（大修、二次防腐）、设计腐蚀富裕量（厚度）的安全系数，钢波纹管涵洞的耐腐蚀寿命也应达到 50 年（或以上）。

从公路的寿命周期和服务水平的变化看，涵洞服务年限达到 50 年时完全能满足一般公路的需求，所以钢波纹管涵洞完全可以适合一般公路。

对特殊岩土地区，如多年冻土、膨胀土、软土、湿陷性黄土等地区，一般情况下钢筋混凝土圆管涵或盖板涵在使用过程中均出现不同程度的损坏，较严重的病害为地基或基础沉降引起涵洞不均匀沉降导致涵洞破坏。这些地区钢筋混凝土圆管涵或盖板涵的使用寿命有时低于 20 年。而应用钢波纹管涵洞则完全可以解决因地基变形导致的涵洞破坏，同时可以减小路面因地基沉降引起的应力集中。

## 4.3 公路钢波纹管涵洞的应用条件

从国内钢波纹管涵洞的使用情况及其受力特征、防腐分析看，钢波纹管涵洞的应用必须满足以下应用条件：

- （1）必须满足与填土高度相适应的波形及足够的壁厚，确保钢波纹管结构在受荷时局部应力低于钢结构的容许应力；
- （2）钢波纹管的防腐处理必须不低于第五章表 5-16 推荐标准，以确保一定年限

内钢波纹管涵洞具有足够的耐腐蚀能力；钢板壁厚应适当考虑防腐富裕量；

随着国内钢波纹管涵洞的广泛应用，关于波形和壁厚优化的研究将逐步深入，优化后的波形可以采用相对较薄的结构钢适应相同的填土及汽车荷载标准。

#### 4.4 本章小结

1. 从公路的寿命周期和服务水平的变化看，涵洞服务年限达到 50 年时完全能满足一般公路的需求，所以钢波纹管涵洞完全可以适合一般公路。从使用效果看，公路钢波纹管涵洞在多年冻土地区和软土地区效果明显，具有明显的优越性。

2. 钢波纹管涵洞的应用必须满足：①与填土高度相适应的波形及足够的壁厚；②具有足够的耐腐蚀能力。

3. 富锌涂层防腐出现剥离现象，而热浸镀锌未出现明显的锈蚀。

第五章 钢波纹管涵洞的防腐蚀研究

5.1 国外钢波纹管涵洞的防腐研究

5.1.1 美国钢波纹管涵洞的防腐蚀方法

美国钢波纹管的防腐蚀方法，主要包括金属覆盖层和非金属覆盖层。金属覆盖层主要有：锌保护层 I 型（镀锌 610 g/ m<sup>2</sup>，厚约 43 μm，质量与厚度关系不同于国内关系），锌保护层 II 型（镀锌 1220 g/ m<sup>2</sup>，厚约 86 μm）、铝涂层 I 型（镀铝 305 g/ m<sup>2</sup>，厚约 48 μm）、铝涂层 II 型（纯铝镀含硅不大于 0.35%，305 g/ m<sup>2</sup>，厚约 48 μm）。非金属覆盖层包括：沥青涂层（最小厚 1.3 mm）、沥青材料内覆盖和铺装（厚 3.2 mm）、混凝土材料内覆盖和铺装层（厚 3.2 mm）、聚合物沥青材料内覆盖和铺装（最小厚 1.3 mm）、聚合物涂装，沥青纤维覆盖层等。

表 5-1 钢波纹管 CSP 产品应用指南

覆盖层	水环境						
	一般条件	弱腐蚀	腐蚀	无磨蚀或较低磨蚀（水平1和2）	中等磨蚀（水平3）	强磨蚀（水平4）	提供额外的土壤保护
锌层（镀锌）	++	++		+			
铝层类型 II	+	+		+			
沥青涂层	+	+	+	+			+
沥青覆盖和铺装	+	+		+	+		+
聚合物改性沥青铺装**	+	+	+	+	+		
聚合物涂层	+	+	+	+	+		+
聚合物涂层和铺装，	+	+	+	+	+	+	+
聚合物和聚合物改性沥青涂层	+	+	+	+	+	+	+
沥青纤维涂层	+	+	+	+			+
纤维沥青铺装	+	+	+	+	+		+
高强混凝土	+	+		+	+		
混凝土铺装75 mm	+	+		+	+	+	

注：+指可适用覆盖层，\*见美国钢铁学会图表，\*\*使用沥青全涂。

钢波纹管雨水管在水环境中的覆盖层可参照表 5-1 并结合表 5-2 使用,非金属覆盖层的使用寿命参考表 5-3,对镀锌层的使用寿命参见图 1-1。

表 5-2 钢波纹管的环境指南

PH值	涂层	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	最大磨蚀水平
水/土电阻率 20000 ~ 100000 Ω - cm	铝涂层(牺牲)				（见美国 钢铁学会图）								2
	铝涂层类型 II（最小电阻率 15000）												2
水/土电阻率 >10, 000 Ω - cm	锌涂层(牺牲)												2
	铝涂层类型 II（最小电阻率 15000）												2
水 & 土 电阻率 >2, 000 Ω - cm	沥青涂层												2
	沥青涂层和铺装												3
	聚合物改性沥青涂层*												3
	聚合物预涂层 (最小电阻率 1000 Ω - cm)												3
	聚合物预涂层和 铺装(最小电阻 率 1000 Ω - cm)												4
	Aramid 纤维沥青涂 层												2
	Aramid 纤维沥青涂 层铺装												3

\*使用沥青全涂层

表 5-3 非金属保护涂装的服务寿命增加量,年

覆盖层	水环境（磨蚀水平）			备注
	水平1&2	水平3	水平4	
沥青涂层	10	N/R	N/R	
沥青涂层和铺装	30	30	30	
聚合物改性沥青涂层	45	35	N/R	
聚合物预涂层	80+	70	N/R	
聚合物预涂层和铺装	80+	80+	30	
聚合物预涂层上聚合物改性沥青涂 层	80+	80+	30	
Aramid 纤维沥青涂层	40	N/R	N/R	
Aramid 纤维沥青铺装	50	40	N/R	
高强混凝土衬里	75	50	N/R	
混凝土内铺装(75 mm(3英寸))	80+	80+	50	

注：N/ R=不推荐

一般地，锌涂层 PH 值适用范围为 6~12.5, 在酸和强碱溶液中金属表面膜缺损后腐蚀速率较高。铝涂层类型 II 在一些环境中形成氧化铝惰性膜或覆盖层预防腐蚀, 在 PH 值较低和软水中镀铝比镀锌占优势。在磨蚀条件下和水中，锌氧化膜很快形成后，两覆盖层基本相当。在碱溶液 PH 值大于 9，铝涂层类型 II 易受到碱腐蚀。

5.1.2 钢波纹管涵洞的使用寿命和效果

1978 年，美国钢铁学会 AISI 研究表明钢波纹管应用于雨水管时，81 道中 77 道保持良好状况，其使用时间为 16~65 年；四道需要维修的平均使用 32 年。

1986 年，美国钢波纹管协会 NCSPA 与美国钢铁学会 AISI 合作，对钢波纹管排水管



道进行研究，使用时间 20～74 年，结果表明涂装后的钢波纹管系列在一些土和水环境下可提供近 100 年的寿命。

1993 年，英国哥伦比亚 21 个结构板和有镀锌保护层的内壁，安装时间全部超过 20 年，试验估计除 2 个结构外，服务寿命超过 100 年。

国外最新研究表明：钢波纹管涵洞平均寿命的期望值为 81 年，最小 50 年的寿命可达到 83%。

5.2 国内常用的金属防腐蚀方法

5.2.1 常用的金属防腐蚀方法

对金属表面，常用的防腐蚀方法有：（1）电化学保护；（2）添加缓蚀剂；（3）金属表面覆盖层；（4）用非金属材料代替金属材料；（5）选用有色金属或合金材料；（6）除掉介质中的有害成份；（7）钝化液处理；（8）选用合理的结构，先进的工艺流程。其中金属表面覆盖层可分为：金属镀层的保护和非金属材料保护。

金属镀层的保护是将有色金属材料，采用气喷涂或电镀、热浸、渗镀、化学镀层等方法依附在被保护的金属表面上，防止介质对金属表面的腐蚀作用。非金属材料保护是采用耐腐蚀的非金属材料，如各种陶瓷砖、板、橡胶、塑料、玻璃钢及涂料等，对金属表面进行衬涂，防止介质与金属接触，达到防腐蚀的目的。

表 5-4 大气环境中锌层的估计耐用年数

大气环境	锌层厚度					
	400g/m <sup>2</sup> (57 μm)		500g/m <sup>2</sup> (71 μm)		600g/m <sup>2</sup> (86 μm)	
	年腐蚀量 g/m <sup>2</sup>	使用年数 a	年腐蚀量 g/m <sup>2</sup>	使用年数 a	年腐蚀量 g/m <sup>2</sup>	使用年数 a
重工业地区	40.1	9	40.6	11	40.1	13
海岸地区	10.8	33	10.9	41	10.8	50
郊外地区	5.4	67	5.2	86	5.2	104
市内地区	17.5	21	17.7	25	17.7	30

注：根据日本热浸镀协会 1964～1974 年大气暴露试验结果计算出来的。

5.2.2 常用的金属覆盖层防腐蚀方法比较

建筑钢结构金属覆面防腐蚀的施工工艺，常用的有电镀、喷涂和热浸镀三种。

电镀是在直流电的作用下，金属从金属盐的水溶液中析出，结果形成了保护性能良好的金属覆盖层。电镀工艺需要各种镀槽设备，因此限制了在大型构件上的使用。

喷涂是用压缩空气将熔融的金属雾化成微粒，喷射在预先准备好的金属构件表面

上形成金属的保护层。喷涂工艺的设备简单,基本上不受被喷构件尺寸、形状的限制,亦不受施工场所的限制,应用较为广泛。1974年美国热喷涂委员会通过19年的现场挂片腐蚀试验,发现:①要确保碳钢基体在海水、海洋大气和工业大气环境中19年不被腐蚀,喷铝涂层厚度80~150 $\mu\text{m}$ ;对喷铝涂层进行封孔处理并涂装,成为复合耐蚀涂层,则耐蚀期更长;增加喷铝涂层的厚度,对延长涂层的防腐寿命并无益处。②喷锌涂层需340 $\mu\text{m}$ 厚,才能保护碳钢基体在海水中19年不被腐蚀;如果对喷锌涂层进行封孔和涂装则其厚度可减至250 $\mu\text{m}$ ;在海洋大气和工业大气中,不进行封孔处理,喷锌层需要230 $\mu\text{m}$ 。喷锌层的防护寿命与其涂层厚度成正比。

喷锌涂层,通常应用于淡水、乡村大气环境和弱碱( $\text{pH}7\sim12$ )介质中,使用温度低于65 $^{\circ}\text{C}$ 。喷铝涂层在海水、海洋区大气、含 $\text{SO}_2$ 的工业区大气和偏酸性( $\text{pH}7\sim4$ )的介质中有优良的耐蚀性,且具有优良的耐热抗氧化性能。对于不同的自然腐蚀环境,不同的防蚀寿命要求,喷锌、铝的推荐涂层厚度列于表5-5。

表 5-5 不同环境和防护寿命要求的喷涂层推荐厚度

腐蚀环境	防护寿命 年	涂层厚度 $\mu\text{m}$			
		喷铝		喷锌	
		不封闭	封闭	不封闭	封闭
非污染的海滨 区大气	>20	150	150	250	150
	10~20	-	100	150	100
	5~10	-	-	100	-
污染的海滨 区大气	>20	250	150	350	250
	10~20	150	100	250	150
	5~10	-	-	150	100
海水飞溅区 (或盐雾环境)	>20		150	-	250
	10~20		-	250	175
	5~10		100	150	150
	<5		-	100	-
海水浸渍	>20		150	-	250
	10~20		-	250	150
普通干燥大气	>20	100		100	
	10~20	-		-	
潮湿大气	>20	150	100	150	100
	10~20	100	-	100	-
非污染的 内陆大气	>20	150	100	150	100
	10~20	100	100	100	100
污染的内陆大气	>20	150	150	250	150
	10~20	100	100	150	100
	5~10	-	-	100	-
非饮用淡水	>20	150	-	150	-
	10~20	-	100	-	150

金属构件浸渍在液态金属中,经过一段时间,就在构件表面上粘附上一层金属保护层,这种工艺称为热浸镀。热浸镀工艺比较简单、方便,镀层与基底金属之间有较大的附着力。

表 5-6 海港工程钢结构采用喷涂的防护要求

腐蚀环境	使用年限, 年	喷涂金属层厚度, $\mu\text{m}$		封闭涂层厚度, $\mu\text{m}$	
		锌	铝	锌	铝
大 气 区	$T \geq 20$	250	200	30~60	30~60
	$10 \leq T < 20$	150	100	30~60	30~60
浪 溅 区	$T \geq 20$	250	200	30~60	30~60
	$10 \leq T < 20$	150	100	30~60	30~60

注: 表中喷锌、喷铝可选择一种。

一般地, 碳钢表面覆面金属施工方法宜采用热浸镀或喷涂, 有条件时也可采用电镀。电镀层的厚度一般比较薄, 喷涂层的厚度不应小于  $120\mu\text{m}$ , 热浸镀层的厚度不应小于  $50\mu\text{m}$ 。

热喷涂与热浸镀和电镀层较的特点及比较见表 5-7。海港工程钢结构采用喷涂金属防护时, 在大气区和浪溅区的防护要求见表 5-6。

表 5-7 涂覆锌、铝涂层的不同方法的比较

特点 \ 工艺	热喷涂	热浸镀	电镀
优点	1. 涂层厚度 $0.05 \sim 0.35\text{mm}$ , 可控可调 2. 不受工件形状和尺寸限制 3. 可现场施工, 亦可工厂化生产 4. 容易封孔, 涂装 5. 涂层寿命长	1. 涂层厚度 $0.05 \sim 0.08\text{mm}$ 2. 涂层完全致密, 无孔 3. 涂层与基材结合强度高 4. 适于大批量生产, 成本低 5. 涂层寿命较长	1. 涂层厚度 $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ 2. 特别适合小零件和内壁大批量生产 3. 投资少, 见效快 4. 工件不受热
缺点	1. 涂层有一定孔隙, 一般需封孔 2. 不适合涂覆小件及小管内壁 3. 喷涂材料有飞溅损失, 成本较高	1. 工件受热, 可能产生变形 2. 工艺流程多, 工作尺寸受限制 3. 熔融锌、铝熔池中构件的腐蚀 4. 表面不易再涂装 5. 涂层含铁, 耐蚀性有所下降	1. 涂层薄, 寿命不太长 2. 沉积速率较低 3. 废水处理问题 4. 可能产生吸氢问题 5. 工件尺寸、形状受限制

5.2.3 常用的非金属覆盖层防腐蚀方法

非金属涂层是涂于物体表面, 能形成具有保护、装饰或特殊功能的固态涂膜。防腐涂层的最基本作用是在被保护物体表面形成一惰性隔离层, 将金属与腐蚀介质隔离, 使土壤和水、大气中的  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  等腐蚀介质不能和金属接触, 发生腐蚀反应。某些涂层中的物质具有化学或电化学作用, 如可使金属表面生成致密的氧化膜, 起钝化作用, 或吸附在金属表面、增大腐蚀介质和金属发生反应的阻

力，起缓蚀作用；或涂层中含有比钢铁还原性更强的金属粉末，使钢铁从腐蚀原电池的阳极转化为阴极而不会被腐蚀，起阴极保护作用。形成涂层的液体和固体材料通称为涂料。

不同种类的涂层在不同环境下具有不同的使用寿命。一般认为，在土壤中石油沥青涂层的使用寿命为 15~30 年,煤焦油瓷漆的使用寿命为 30~100 年，熔结环氧的使用寿命为 50~60 年。

涂料的防腐设计使用年限，指涂装工程在正确施工、正常使用和局部维修条件下，预计从开始投入使用至涂层失效需要全面维修时所持续的时间。一般腐蚀涂层的使用年限，见表 5-8。

表 5-8 防腐涂层的使用年限

构配件名称	维修困难部位的构件	重要构配件	一般构配件
设计使用年限, 年	>8	>4	>2

表 5-9 防腐蚀涂层配套性与使用年限

设计使用年限, 年	特征
>8	(1) 除锈等级不低于 Sa2.5; (2) 构件喷、镀锌、铝或采用富锌底漆; (3) 附着力不低于 1 级的底漆; (4) 甲类或乙类涂料, 根据需要可采用两种不同涂料配套。
4~8	(1) 除锈等级不低于 Sa2 或 Sa3; (2) 附着力不低于 2 级的底漆当处于年平均湿度>75%的室外环境时, 宜增加富锌底漆; (3) 甲类或乙类涂料。
2~4	(1) 除锈等级不低于 Sa2; (2) 附着力不低于 2 级的底漆; (3) 乙类或丙类涂料

注: 表中任何一项达不到要求时, 使用年限的等级均按照低者考虑。工厂加工的构配件除锈如采用 Be 级时, 可代替表中 Sa2 级。

建筑中的钢构件的防腐蚀涂装总厚度根据设计使用年限、等级、室内室外等条件确定，其具体要求见表 5-9。

表 5-10 气态或固态介质作用钢构件防腐蚀涂层厚度 (μm)

设计使用年限, 年	强腐蚀		中腐蚀		弱腐蚀	
	室外	室内	室外	室内	室外	室内
>8	260	220	220	180	180	150
4~8	220	180	180	150	150	120
2~4	180	150	150	120	120	100

按涂料的防护作用可将防腐涂料分为防锈涂料和防腐蚀涂料两大类。建筑上将防

腐涂料分为：树脂类、涂料类、水玻璃类、聚合物水泥砂浆类、沥青类和塑料类。钢结构选择防腐蚀涂料品种的一般原则为：①应选用耐候性优良的涂料；②经常有水作用时，宜选用沥青、环氧沥青类涂料，当耐磨要求较高时，宜选聚氨酯类涂料；③污水环境，宜选用树脂类涂料或鳞片涂料等抗渗性和耐腐蚀性优良的涂料；④涂层总厚度大于  $150\mu\text{m}$  时，宜选用厚浆型涂料。⑤表层涂有多层涂料时，涂层之间应有良好的配套性。⑥处于潮湿环境且耐久性要求较高时宜增加喷、镀金属层或喷涂富锌底漆。

### 1. 涂料类防腐工程

涂料类适合于中弱腐蚀性液态介质、气态介质和各类大气。碳钢材料必须注意选择合适配套底漆，各类底层涂料的性能见表 5-11。

表 5-11 钢铁推荐常用防腐蚀底层涂料的品种及性能

底漆名称	性 能
无机富锌底漆	对钢铁基层有阴极保护作用，耐水、耐油、防锈性能优异，耐高温，不能在低温环境下施工，对除锈要求严格；与有机、无机涂料均能配套使用，不得与油性漆配套；不宜涂刷过厚，并不得长期暴露。适用于高温或室外潮湿环境的钢铁基层。
环氧富锌底漆	对钢铁有阴极保护作用，耐水、耐油，附着力强，防腐性能好，对除锈要求严格；适用于室内外潮湿环境或对涂层耐久性要求较高的钢铁基层。后道漆宜用云铁环氧或氯化橡胶底漆或中间漆。
环氧云铁底漆	附着力与物理力学性能良好，具有较好的耐盐雾、耐湿热和耐水性能，适用于环氧富锌的后道漆也可直接作底漆，可与多种涂料配套。
环氧酯铁红底漆	涂膜坚韧，附着力好，能与多种涂料配套。
环氧酯锌黄底漆	涂膜坚韧，附着力好，能与多种涂料配套。
环氧红丹防锈底漆	有优良的防锈性能，成膜后机械强度高，附着力强，涂膜干燥迅速，耐水，与各种无机、有机涂料均能配套，适用于要求防锈能力强的钢铁基层

### 2. 聚合物水泥砂浆类防腐工程

聚合物水泥砂浆类适合于中等浓度以下的碱液、部分有机溶剂、中性盐、腐蚀性水 ( $\text{PH}>1$ )。聚合物水泥砂浆由水泥、骨料和可以分散在水中的有机聚合物拌合而成。在环境条件下聚合物成膜覆盖在水泥颗粒粒子上，并使水泥基体与骨料形成强有力的粘结。常见的聚合物有：氯丁胶乳、丁苯胶乳、聚丙烯乳液、聚丙烯酸酯胶乳、环氧树脂乳液、不饱和聚酯树脂乳液等。研究表明，与普通水泥砂浆相比较，聚合物水泥砂浆与钢结构的粘度大，抗渗性提高，且具有更好的耐磨性、抗冲击性，特别是聚合物在水泥颗粒空隙之间成膜并形成网状，起到了隔离腐蚀介质的作用。应用在波纹管涵洞内侧更能显示其耐磨性、抗冲击性的优点。

### 3. 沥青类防腐工程

沥青类适合于中低浓度非氧化性酸、各类盐、中等浓度碱、部分有机酸。沥青类防腐工程包括：沥青+玻璃布+聚乙烯工业膜组合形成防腐层结构裹覆在管道外侧起防腐作用和采用沥青胶泥、沥青砂浆对结构内表面进行防腐。在一些已经进行过防腐处理的管道表面也可仅涂刷一层沥青起防水防腐作用。

### 4. 塑料类防腐工程

由于钢波纹管的波纹形，且管径一般不大，在其内侧内衬塑料膜的工艺相对复杂，内衬单价相对较高，不适用于公路等土建工程。但对旧管进行维修或修复时可以考虑采用内衬法修复技术。

此外，近年来发展的软管翻衬工法采用玻璃纤维编织成的软管，表面以 PVC 或 PE 成膜，以热固型树脂、热塑型树脂作为骨架材料，利用水压或气压翻转内衬，衬里厚度 4~20mm，施工管径 DN20~DN3000mm。

## 5.3 钢波纹管涵洞的腐蚀机理及影响因素

金属管道常见的腐蚀按受腐蚀的环境，可分为：大气腐蚀、土壤腐蚀、水腐蚀和化学介质腐蚀。对金属波纹管涵洞，外侧主要为土壤腐蚀，内侧主要为水腐蚀和大气腐蚀。

### 5.3.1 土壤的腐蚀机理

土壤是固态、液态、气态三相物质所组成的混合物，由土壤颗粒组成的固体骨架中充满着空气、水和不同的盐类。地下金属结构在土壤中的腐蚀速度跟土壤类型、土壤性质有着密切关系。影响土壤腐蚀的主要因素有：土壤的含盐量、含水量、土壤电阻率。一般来说，土壤的含盐量、含水量愈大，土壤电阻率愈小，土壤腐蚀性也愈强。图 5-1 为金属表面最大腐蚀率与各相关参数的相关性分析图，图中基本数据来源于文献[17、18]。从图中可看出：最小电阻率与最大腐蚀率的相关性较好，可用指数表达式表达，有机质含量、氯离子含量、平均含水量、硫酸根离子含量和全盐含量及 PH 值等与最大腐蚀率的相关性不强。对潮土和棕漠土可以用电阻率来推算最大腐蚀率。

根据调研结果，我国特强腐蚀性土壤除南方的赤红壤外，其余均为荒漠土壤。强腐蚀性土壤包括的土类则比较多，除红壤、赤红壤外，滨海盐土、潮土、黄棕壤、紫色土、褐土及部分棕漠土，都属于这一等级。中等腐蚀性土壤包括了各类潮土、红色石灰土与绿洲黄土。弱腐蚀性土壤，虽然主要是各类盐土与盐化土壤，但也包括了灰

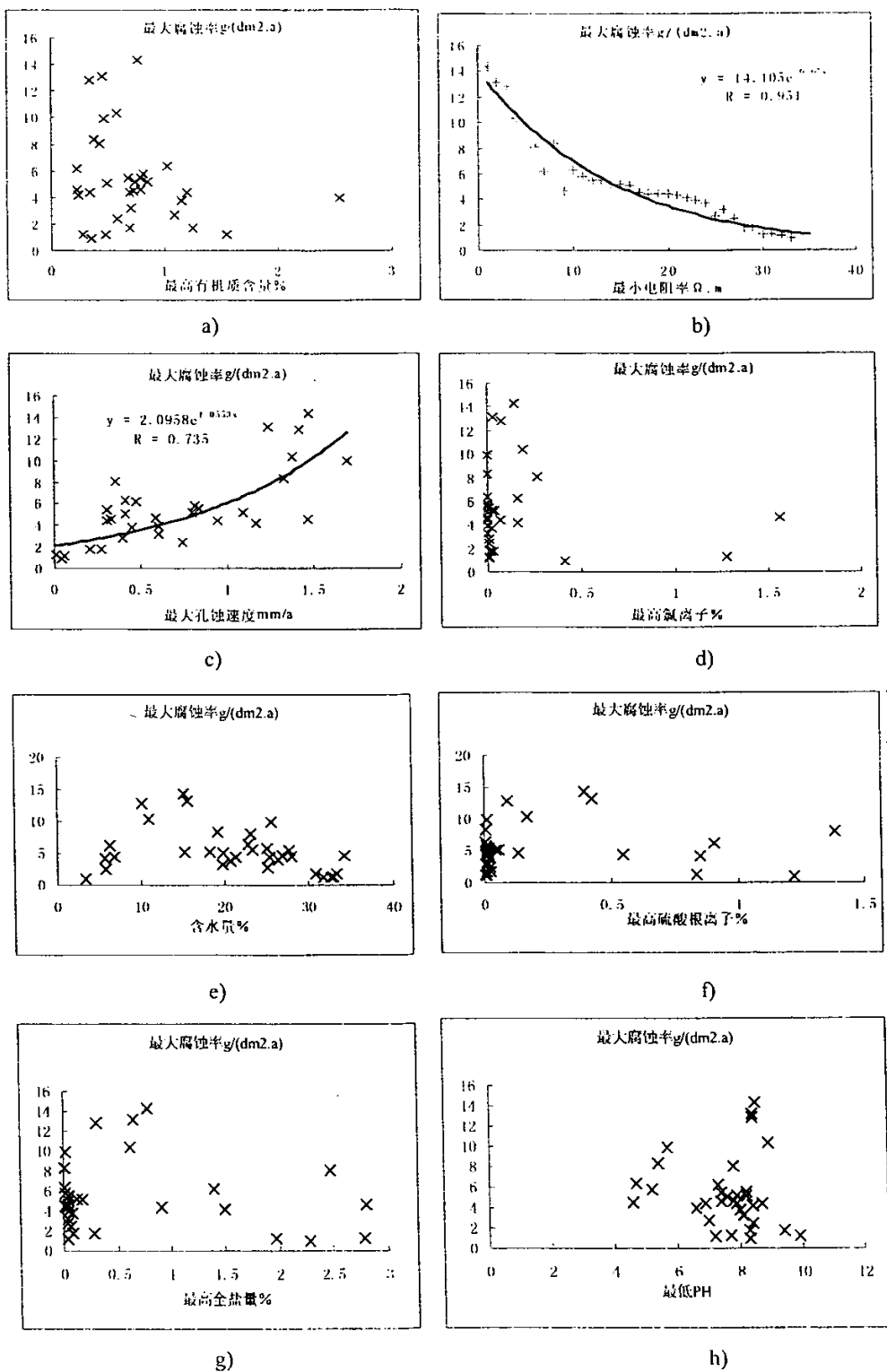


图 5-1 最大腐蚀率与各参量的相关性

潮土、棕漠土与灰钙土。通常水分状况下的我国各类土壤，大多属于强腐蚀与中等腐蚀的范围。

研究表明，含水量较低（低于 10%）或较高（高于 25%）时，高腐蚀概率均比含水量在 10~25% 时低。潮土和棕漠土的腐蚀率与含水量存在二次多项式的相关关系，在最不利含水量时腐蚀率存在一定的最大值，潮土和棕漠土之间的最不利含水量存在明显的差异，潮土在 30% 附近，棕漠土则在 16% 附近。

### 5.3.2 大气环境中的腐蚀

影响大气腐蚀的主要因素有：钢铁的临界湿度、大气中有害物质。在腐蚀领域，将大气分为海洋大气、工业大气、城市大气和农村大气，表 5-12 为不同金属在这几种大气中的腐蚀速率。海洋大气湿度高并含有盐雾，其腐蚀性要比内陆大气严重。

表 5-12 碳钢、锌、铝在各种大气中的平均腐蚀速率（ $\mu\text{m/a}$ ）

材料	农村大气	城市大气	工业大气	海洋大气
碳钢	4~65	23~71	26~175	26~104
锌	0.2~3	2~16	2~16	0.5~8
铝	0~0.1	0~1		0.4~0.6

### 5.3.3 金属在水溶液中的腐蚀

#### 1. 金属在淡水中的腐蚀

铸铁、低碳钢和镀锌钢的淡水腐蚀是典型的电化学过程，与水中溶解氧量、水的硬度、含盐量、含硫量、温度、流速及 pH 值等因素有关，水中含盐量增加，其导电能力增加，因此腐蚀速率增加。当溶盐量超过一定的浓度后，氧的溶解度降低，致使腐蚀速率减小。

#### 2. 金属在海水中的腐蚀

海水是含有多种盐类的电解质溶液，还含有生物、悬浮泥砂、溶解的气体及腐败的有机物等，腐蚀性较强，影响腐蚀的因素也多，主要是：（a）所含盐类及其浓度；（b）溶解的氧量；（c）温度；（d）流速；（e）海洋生物。

由于海水接近中性，并含有大量的氯离子，故海水对于钢铁等大多数金属的腐蚀，腐蚀速度主要是由阴极反应过程中氧的去极化作用所控制。由于海水的电阻率很小，故其腐蚀速率一般要比土壤中大得多。飞溅区和潮差区，金属结构受浪花和海潮



的冲击,不仅会发生全面腐蚀,还有坑蚀和冲蚀,需要采取特殊的防腐保护层。研究表明,不同水深处,腐蚀速率不同。

### 5.3.4 金属波纹管涵洞的磨蚀

美国钢铁研究会研究表明,在大多情况下,钢波纹管(雨水管)有一定的坡度,在坡度不大时基本没有水流带来的泥砂冲刷腐蚀问题。然而当流速较高时(大于5m/s)腐蚀将变得较明显,并有泥砂磨蚀随之而来。如果砂石在管内壁冲洗,磨耗量将增加。在钢波纹管水管设计中应充分考虑管道的磨蚀。如磨损较严重应采用不同的内壁处理方法。

美国钢铁研究会用磨损水平来预测使用寿命,将钢波纹管涵洞的磨蚀按照水流速度和物质组成划分为非磨蚀、低磨蚀、中等磨蚀和严重磨蚀。

非磨蚀:(水平 1) 没有砂石推移物质,对应于各种速度或雨水管。

低磨蚀:(水平 2) 有砂和砾石推移物质,速度小于等于 1.6m/s。

中等磨蚀:(水平 3) 有砂和砾石推移物质,速度在 1.6~5.0m/s 之间。

严重磨蚀:(水平 4) 大量的砾石和岩石推移,速度超过 5.0m/s。

综上所述,影响土壤腐蚀的主要因素有:土壤的含盐量、含水量、土壤电阻率;影响大气腐蚀的主要因素有:钢铁的临界湿度、大气中含有物质、湿度、盐雾等;影响淡水腐蚀的主要因素有:含盐量等;影响海水腐蚀的主要因素有:盐类及浓度、溶解的氧量、温度、流速、海洋生物;影响磨蚀的主要因素有:泥砂、流速。

## 5.4 国内公路交通行业结构及设施防腐

### 5.4.1 高速公路交通安全设施防腐技术条件

“GB/T18226-2000 高速公路交通工程钢构件防腐技术条件”按钢构件表面保护层分为镀锌、镀铝、镀锌(铝)后涂塑和涂塑。镀锌、镀铝均为热浸镀,对钢板和钢管(壁厚大于3mm),镀锌和镀铝层的质量分别为600 g/ m<sup>2</sup>和120 g/ m<sup>2</sup>;对紧固件和连接件要求分别为350g/ m<sup>2</sup>和110 g/ m<sup>2</sup>。单涂塑钢板和钢管及紧固件、连接件等要求厚度0.38mm。对钢板和钢管,镀锌(270 g/ m<sup>2</sup>)或镀铝(61 g/ m<sup>2</sup>)后的第二层涂塑,聚氯乙烯、聚乙烯厚度大于0.25mm,聚酯厚度大于0.076mm。对紧固件、连接件,镀锌(120 g/ m<sup>2</sup>)或镀铝(61 g/ m<sup>2</sup>)后的第二层涂塑,聚氯乙烯、聚乙烯厚度大于

0.25mm，聚酯厚度大于 0.076mm。

5.4.2 高速公路交通安全设施设计与施工技术规范 JTJ074-94

高速公路交通安全设施设计与施工技术规范 JTJ074-94 要求所有波形梁护栏的冷弯型钢部件均应作防腐处理，一般可采用热浸镀锌。镀锌时活动护栏的防腐处理原则上与波形梁护栏相同，镀锌量规定为 600g / m<sup>2</sup>；紧固件和锚固件镀锌量规定为 350g / m<sup>2</sup>；螺栓、螺母等紧固件在采用热浸镀锌后，必须清理螺纹或进行离心分离处理。在条件允许的情况下，螺栓螺母等紧固件也可采用粉镀锌技术。

钢材有严重腐蚀作用的地区，现国内采用的有热浸镀铝、浸塑、喷塑等方法，当采用热浸镀铝时，附着量可在 110~120g / m<sup>2</sup>。在腐蚀特别严重的地区或出于对美观上的要求，护栏钢构件可在镀锌后再涂塑或油漆。

5.4.3 高速公路波形梁钢护栏 JT/T281-1995

高速公路波形梁钢护栏 JT/T281-1995 要求护栏的所有构件均应进行金属防腐处理，一般宜采用热浸镀锌方法。当采用热浸镀铝、静电喷涂等其他防腐方法时，应有可靠的技术数据和试验验证资料，其防腐性能应不低于规定的热浸镀锌方法的相应要求。镀锌构件的锌附着量应符合表 5-13 的要求。

表 5-13 镀锌构件的锌附着量

构件名称	三点法试验平均锌附着量 (g / m <sup>2</sup> , 单面)	三点法试验最低锌附着量 (g / m <sup>2</sup> , 单面)
波形梁板、立柱、端头	600	425
紧固件、防阻块、托架	350	275

5.4.4 钢桥防腐要求

公路桥涵施工技术规范 JTJ041-2000 钢桥工地涂装分为涂层系统和喷涂金属系统。防腐蚀涂料应具有良好的附着性、耐蚀性，工地涂装施工组织设计应满足使用要求；喷涂金属的表面处理的最低等级为 Sa2.5；喷涂金属系统的封闭涂层底漆应具有良好的封孔性能。防腐蚀涂料设计使用年限，参考取值见表 5-14。喷涂金属系统包括喷涂金属层和封闭涂层，可参考表 5-15 确定。

表 5-14 涂层系统设计使用年限参考

设计 使用 年限	配套涂层系统			平均涂层厚度（μm）	
				（1）	（2）
10～ 20	底层		富锌漆（无机或有机）	10	75
	面层	I II III IV	氧化橡胶漆 聚胺酯漆 丙烯酸树脂漆 乙烯树脂漆	280	250
5～10	底层		富锌漆（无机或有机）	40	
	同品种底面 层配套	I II III	氧化橡胶漆 聚胺酯漆 乙烯树脂漆	100	
		第一类 I II III	橡胶树脂漆（氧化橡胶漆或氧化碳 化聚乙烯漆） 乙烯树脂漆 丙烯酸树脂漆	180～220	
		第二类 I II III IV	油性漆 酚醛树脂漆 醇酸树脂漆 环氧树脂漆	190～230	
		第三类	聚胺酯漆	220～240	
		第四类	环氧树脂漆	240～260	
<5	同品种底面 层配套	I II III IV	油性漆 酚醛树脂漆 醇酸树脂漆 环氧树脂漆	170～190	
			其他	200	

注：①涂层厚度可按《漆膜厚度测定法》（GB1764—79）测定；  
②表列 I、II、III、IV 配套涂料及平均涂层厚度（1）、（2）可任选其中一种；  
③表列各种涂料，系指该涂料系列中的防锈漆和防腐蚀漆。

表 5-15 喷涂金属系统

设计使用年限，年	喷涂金属层厚度（μm）		封闭涂层厚度（μm）
	锌	铝	
≥20	250	200	30～60
10≤t<20	150	100	30～60

注：表中喷锌、喷铝可任选一种。

5.4.5 工业管道的防腐蚀推荐方案

工业金属管道设计规范 GB50316-2000 要求埋地钢管道的外表面应作防腐层，其层数按管道及土壤环境确定；地上管道的外表面防锈一般是底漆与面漆配套使用。

给水排水管道工程施工及验收规范 GB50268-97，对钢管道的防腐按内壁、外表面分开考虑。内壁采用水泥砂浆内防腐层，水泥采用 32.5 级以上标号，水泥砂浆抗压强度不小于 30N/mm<sup>2</sup>。外防腐层采用石油沥青涂料、环氧煤沥青涂料。

5.5 我国钢波纹管涵洞的防腐蚀推荐方案

通过前文分析研究，结合我国防腐技术和公路服务寿命、服务水平，参考建筑行业、公路工程其它钢构件和工业管道等的防腐蚀措施以及国内外埋地管道、排水管的防腐蚀研究与应用成果，针对不同场合推荐采用表 5—16 的防腐方案。

表 5—16 钢波纹管涵洞不同场合推荐的防腐方案

方案	适用场合	内壁防腐蚀方案	外壁防腐蚀方案
方案一	干旱~半干旱、弱腐蚀地区	镀锌层厚 86 μm + 热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm + 热涂沥青层
方案二	弱腐蚀	镀锌层厚 86 μm + (聚合物) 水泥砂浆 ***+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm + (聚合物) 水泥砂浆 ***+热涂沥青层
方案三	中等腐蚀	镀锌层厚 86 μm + 涂层系统 1+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm + 热涂沥青层
方案四	强腐蚀	镀锌层厚 86 μm + 涂层系统 2+热涂沥青层	镀锌层厚 86 μm + 涂层系统 1+热涂沥青层
方案五	海港地区强腐蚀	镀锌层厚 86 μm + 涂层系统** + 聚合物水泥砂浆	镀锌层厚 86 μm + 涂层系统 2 + 热涂沥青层
方案六	山区冲刷严重地区	镀锌层厚 86 μm + (聚合物) 水泥砂浆 ***	镀锌层厚 86 μm + 热涂沥青层
方案七	钢波纹管涵洞腐蚀层的更新或维护	(1) 涂层系统：底层：富锌漆（无机或有机）厚 75 μm，面层：氧化橡胶漆、聚胺酯漆、丙烯酸树脂漆、乙烯树脂漆厚 250 μm 或 (2) 喷涂镀锌厚 250 μm。	

注：(1) 当采用热浸镀锌、静电喷涂等其他防腐方法代替热浸镀锌时，应有可靠的技术数据和试验验证资料，其防腐性能应不低于本标准规定的热浸镀锌方法的相应要求。(2) 涂层系统 1 参见钢桥表 5-14 中<5 年的涂层系统，涂层系统 2 参见钢桥表 5-14 中 5~10 年的涂层系统。(3) \*\*\*可采用水泥砂浆或聚合物水泥砂浆。

5.6 对钢波纹管涵洞的防腐蚀技术要求

采用热浸镀锌方法进行金属防腐处理时，热浸镀锌所用的锌应为 GB 470 规定的 1 号或 0 号锌。镀锌构件的锌附着量应符合要求。锌附着量采用氯化锑法测定，也可用镀层测厚仪直接测量锌层厚度，发生争议时，以氯化锑法作为仲裁试验方法。镀锌构件表面应具有均匀完整的涂层，颜色一致，表面具有实用性光滑，不允许有流挂、滴瘤或多余结块。镀件表面应无漏镀、露铁等缺陷。有螺纹的构件在热浸镀锌后，应清理螺纹或作离心分离。镀锌构件的锌层应均匀，试样经硫酸铜溶液浸蚀五次不变红。镀锌构件的鲜层应与基底金属结合牢固，经锤击试验镀锌层不剥离、不凸起。

当采用热浸镀锌、静电喷涂等其他防腐方法时，应有可靠的技术数据和试验验证资料，其防腐性能应不低于本标准规定的热浸镀锌方法的相应要求。

5.6.1 镀锌层技术要求

1. 外观质量

镀锌构件表面锌层应均匀完整、颜色一致，表面具有实用性光滑，不允许有流挂、滴瘤或多余结块。镀件表面应无漏镀、露铁等缺陷。有螺纹的构件在热浸镀锌

后,应清理螺纹或作离心分离。

#### 2. 锌层均匀性

镀锌构件的锌层应均匀,试样经试验后,无金属铜的红色沉积物。

#### 3. 锌层附着性

镀锌构件的锌层应与基底金属结合牢固,经试验后,锌层不剥离、不凸起,不得开裂或起层到用裸手指能够擦掉的程度。

#### 4. 锌层耐盐雾性

镀锌构件经试验后,基体钢材不应出现腐蚀现象,基体钢材在切割边缘出现的腐蚀不予考虑。

### 5.6.2 镀铝层技术要求

#### 1. 外观质量

镀铝构件表面铝层应连续,不允许存在明显影响外观质量的熔渣、色泽暗淡以及假浸、漏浸等缺陷。

#### 2. 镀层均匀性

镀铝构件的铝层应均匀,不允许有针孔,试样经试验后,无红褐色的氢氧化铁沉积物。

#### 3. 镀层附着性

铝构件的铝层应与基底金属结合牢固,经试验后,铝层不剥离、不凸起,不得开裂或起层到用裸手指能够擦掉的程度。

#### 4. 镀层耐盐雾性

镀铝构件经试验后,基体钢材不应出现腐蚀现象,基体钢材在切割边缘出现的腐蚀不予考虑。

### 5.6.3 涂塑层技术要求

#### 1. 涂塑层均匀性

涂塑层应均匀光滑、连续,无肉眼可分辨的小孔、空间、孔隙、裂缝、脱皮及其他有害缺陷。

#### 2. 涂塑层附着性

涂塑层应附着良好,对于聚氯乙烯、聚乙烯涂塑层经剥离试验后,涂塑层断裂,无剥离。对于聚酯涂塑层,经划格试验后,刻痕光滑,涂塑层无剥离脱落。

#### 3. 涂(浸)塑层抗弯曲性能

聚氯乙烯、聚乙烯涂塑层经弯曲试验后,试样应无肉眼可见的裂纹或涂(浸)塑层脱落。

#### 4. 涂塑层耐磨性

按涂塑层耐磨性试验规定的方法,每1000转测得的质量损失应不超过100 mg。

#### 5. 涂塑层耐冲击性

经涂塑层耐冲击性试验后,除冲击部位外,涂塑层无碎裂、开裂或脱落现象。

#### 6. 涂塑层耐化学药品性

经涂塑层耐化学药品性试验后,涂塑层无起泡、软化、丧失黏结等现象。

#### 7. 耐盐雾性

经试验后,除划痕部位任何一侧0.5mm内,涂层应无起泡、剥离、生锈等现象。

#### 8. 耐候性

经人工加速老化试验后,涂塑层不允许产生裂缝、破损等损伤现象,允许轻微褪色。

#### 9. 耐湿热性

经试验后,除划痕部位任何一侧0.5mm内,涂层应无起泡、剥离、生锈等现象。

#### 10. 耐低温脆化性

经试验后,涂塑层仍满足上述(1)~(8)的要求。

### 5.6.4 工地涂装质量检验

对涂层系统:①涂装前应进行表面处理的质量检查,合格后方可进行涂装。②涂装时,涂层遍数和漆膜厚度应符合设计要求,应及时测定湿膜厚度,保证干膜厚度。涂装时发现漏涂、流挂发白、皱纹、针孔、裂纹等缺陷,应及时进行处理。每层涂装前,应对上一层涂层进行检查。涂装后,应进行涂层外观检查。表面应均匀、无气泡、无裂纹等缺陷。③涂层干膜厚度大于或等于设计厚度值的点数占总测点数的90%以上,其他测点的干膜厚度不应低于90%的设计厚度值;当不符合上述要求时,应进行修补。④厚膜涂层应进行针孔检测,针孔数不应超过测点总数20%,当不符合要求时,应进行修补。

对喷涂金属系统:①可目视或用5~10倍放大镜检查,喷涂金属层应颗粒细,并不得有固体杂质、气泡及裂缝等缺陷。②喷涂厚度达不到要求时,应进行补喷或重喷。③孔隙率检测,检测面积宜占总面积的5%,当不合格时,应进行补喷或重喷。④对喷涂金属层与钢结构的结合性能,可采用敲击或刀刮进行检测,当不合格时,应进

行补喷或重喷。

## 5.7 本章小结

1. 国外研究表明钢波纹管涵洞的使用寿命达 50 年以上，期望值可达 100 年。
2. 土壤最小电阻率和最大腐蚀率存在一定的相关关系，对应最大腐蚀率，不同土壤存在不同的最不利含水量，一般在 10~25%，潮土在 30%附近，棕漠土则在 16%附近。
3. 通过分析研究，结合我国防腐技术和公路服务寿命、服务水平，参考建筑行业、公路工程其它钢构件和工业管道等的防腐蚀措施以及国内外埋地管道、排水管的防腐蚀研究与应用成果，首次针对不同场合推荐采用不同的防腐方案；并提出钢波纹管涵洞的防腐技术要求。

## 第六章 公路钢波纹管涵洞设计

### 6.1 公路钢波纹管涵洞设计内容

公路钢波纹管涵洞设计内容主要包括以下方面：

- (1) 公路涵洞水力计算及涵洞直径的设计；
- (2) 涵洞基础设计和埋置深度及斜交角度等的设计；
- (3) 涵洞结构计算；
- (4) 涵洞防腐设计；
- (5) 涵洞细部构造设计和管材强度等要求；
- (6) 涵洞进出口设计及管身与进出口的结合设计。

一般地，与圆管涵相比，波纹管涵洞水力计算应考虑波形对涵内水流性质的影响，本文由于篇幅限制不作重点研究。前文重点讨论了我国公路钢波纹管涵洞的防腐方法和措施，这里也不再重复。由于钢波纹管涵洞对基础要求相对不高，采用换填即可满足一般设计要求，故本章重点讨论结构设计和构造设计、进出口设计等。

### 6.2 国外钢波纹管涵洞结构设计方法

#### 6.2.1 美国公路桥梁设计规范

美国公路桥梁设计规范钢波纹管涵洞等埋置式结构计算采用荷载与抗力系数设计法，对每种相应的极限状态乘以系数的抗力  $R_r$ ，并根据不同荷载组合分别验算。

$$R_r = \Phi R_n \quad (6-1)$$

其中： $R_r$ —公称反力；

$\Phi$ —抗力系数。

表 6-1 埋置结构的抗力系数

	结构类型	抗力系数
金属管	3、结构板管	
	*最小壁面积和压屈	0.67
	*最低缝强度	0.67
	*管拱基础的支撑抗力	参见基础的抗力系数

在使用状态下核算“使用荷载组合 I”下埋置式结构的挠度，并考虑动荷载增加值，按“强度极限组合 I 和 II”针对施工核算金属结构的壁面积、压屈、裂缝破坏、施工柔度限值，计算中采用的柔度系数见表 6-2。



表 6-2 钢波纹管和结构板的柔度系数限值

类型	波纹尺寸 (mm)	柔度系数 (N/mm)
钢管	6.35	0.25
	12.7	0.25
	25.4	0.19

单位长度壁所受的乘有系数的推力  $T_L$  为:

$$T_L = P_L \left( \frac{S}{24} \right) \quad (6-2)$$

式中:  $S$ —管跨度 (mm),  $P_L$ —乘有系数的管顶压力 (MPa)。

不考虑压屈时的单位长度壁的轴向抗力  $R_n$  应为:

$$R_n = \phi F_y A \quad (6-3)$$

式中:  $A$ —壁面积 ( $\text{mm}^2/\text{mm}$ );  $F_y$ —金属屈服强度 (MPa);  $\phi$ —抗力系数。

对 (6-3) 式计算的壁面积应按式 (6-4) 和式 (6-5) 核算压屈抗力。若  $f_{cr} < F_y$ , 则用  $f_{cr}$  代替  $F_y$ , 重新计算  $A$ 。

$$\text{若 } S < \left( \frac{r}{R} \right) \sqrt{\frac{24E_m}{F_u}}$$

$$\text{则 } f_{cr} = F_u - \frac{\left( \frac{F_u k S}{r} \right)^2}{48E_m} \quad (6-4)$$

$$\text{若 } S > \left( \frac{r}{R} \right) \sqrt{\frac{24E_m}{F_u}}$$

$$\text{则 } f_{cr} = \frac{12E_m}{\left( \frac{kS}{r} \right)^2} \quad (6-5)$$

式中:  $S$ —跨度 (mm);  $E_m$ —土的弹性模量 (MPa);  $F_u$ —金属抗拉强度 (MPa);  $r$ —波纹的回转半径 (mm);  $k$ —土刚度系数, 一般认为土的刚度取 0.22 较保守。

对于用纵向接缝装配的管, 接缝的公称抗力应足以发挥管壁中的推力  $T_L$ 。

装卸柔度应按下式计算:

$$EF = \frac{S^2}{EI} \quad (6-6)$$

式中:  $EF$ —柔度系数,  $S$ —跨度 (mm),  $E$ —土的弹性模量 (MPa),  $I$ —壁惯性矩 ( $\text{mm}^4/\text{mm}$ )。

## 6.2.2 AISI 的设计方法

AISI的设计方法是在按预期的水力梯度确定管直径(或管拱尺寸)之后,进行结构设计,确定波纹波形和钢的厚度,以确保安装后具有足够的强度和刚度抵抗活载和恒载。

### 1. 设计荷载

荷载包括: a)路堤填土的恒载,加上其上构造物的表面荷载,集中力或均布力;  
b) 活载—移动荷载,包括冲击荷载。

根据本文第二章分析结论,当管顶上覆盖厚度很小的时候,活载效应较大;并随填土高度增加活载效应减小。AISI标准公路荷载是指AASHTO H-20 和 H-25 活载,标准铁路荷载是指AREA E80活载。表6-3给出了 H-20、H-25和E80活载在管上的压力。

表6-3 公路和铁路活载 (LL)

公路活载			铁路活载	
覆盖厚度 (m)	活载kPa		覆盖厚度 (m)	活载kPa E80
	H-20	H-25		
0.30	86.2	107.8	0.61	181.9
0.61	38.3	47.9	1.52	114.9
0.91	28.7	35.9	2.44	76.6
1.22	19.2	24.0	3.05	52.7
1.52	12.0	15.0	3.66	38.3
1.83	9.6	12.0	4.57	28.7
2.13	8.4	10.5	6.10	14.4
2.44	4.8	6.0	9.14	4.8
			>9.14	—

恒载是考虑在管上的土棱柱。土棱柱作用在管顶水平面上的压力等于:

$$DL=WH \quad (6-7)$$

这里:  $w$ —土的容重,  $kN/m^3$ ;  $H$ —在管上的填土高度,  $m$ ;  $DL$ —恒载压力,  $kPa$ 。

### 2. 设计压力

当覆盖的填土高度大于等于管的跨径或直径,总荷载(活载与恒载之和)的设计压力可用与土壤密度相关的系数 $K$ 来表达。对于 85% 标准密度  $K=0.86$ ; 对于 90% 标准密度  $K=0.75$ ; 对于 95% 标准密度  $K=0.65$ 。AASHTO T-99 或美国材料试验学会ASTM D98推荐的 $K$  值对应于85%标准密度。如果覆盖的高度小于管直径,假定总荷载(TL)作用于管,  $TL=P_v$ 。总体上:

$$\text{当 } H \geq S \quad P_v = K(DL+LL), \quad (6-8)$$

$$\text{当 } H < S \quad P_v = (DL+LL),$$

这里:  $P_v$ —设计压力,  $kPa$ ;  $K$ —荷载系数;  $DL$ —恒载,  $kPa$ ;  $LL$ —活载,  $kPa$ ;

H—覆盖高度, m; S—跨径, m。

### 3. 强度

管结构必须有足够的强度适应管壁受到的径向压力。这样,可确定管壁应力,并与容许值相比较以防屈服、弯曲或裂缝。容许值由破坏性试验得到,应用安全系数为2。

管壁上的推力(称为环向压力)等于管壁的径向应力乘以管半径,或 $C = P \times R$ ,与管壁相切。对常规结构管顶接近半圆,可采用跨径的一半代替半径较为方便。

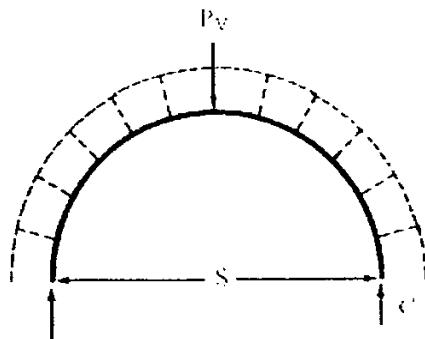


图 6-1 环向压力示意图

$$C = P_v \times S/2 \quad (6-9)$$

式中: C—环向压力, kN;  $P_v$ —设计压力, kPa; S—跨径, m。

对钢波纹管结构回填材料压实度达到90%标准密度,最小屈服点230 MPa,极限应力 $f_b$ ,可用公式(6-10)、(6-11)、(6-12)表达。公式(6-10)代表管壁区受压或屈服的最小屈服点,公式(6-11)代表管壁区环向受弯或屈服,公式(6-12)代表管壁区环向受弯。

当 $D/r \leq 294$

$$f_b = f_y = 230 \text{ MPa} \quad (6-10)$$

当  $294 < D/r \leq 500$

$$f_b = 275 - 558 \times 10^{-4} (D/r)^2 \quad (6-11)$$

或当 $D/r > 500$

$$f_b = 3.4 \times 10^3 / (D/r)^2$$

或当 $D/r > 3.4 \times 10^3$

$$f_b = 4.93 \times 10^3 / (D/r)^2, \quad (6-12)$$

式中: D—直径或跨径, mm; r—波纹半径, mm; I—管壁的惯性矩,  $\text{mm}^4/\text{m}$ ; A—管壁的面积,  $\text{mm}^2/\text{m}$ 。

应用安全系数2和极限应力计算设计应力 $f_c$ :

$$f_c = f_b/2 \quad (6-13)$$

可通过管壁设计应力计算得到的C和容许应力 $f_c$ 来计算管壁面积A。

$$A = C / t_c \quad (6-14)$$

#### 4. 施工刚度

安装管的最小刚度要求——柔度系数FF与波形的组合和金属层厚度相关。

$$FF = D^3 / EI \quad (3-62)$$

式中：FF—柔性模数， $E = 200 \times (10)^3$  Mpa；D—直径或跨径，mm；I—壁的惯性矩， $\text{mm}^4 / \text{mm}$ 。

表6-4 柔度系数与波形高

波高 (mm)	直径 (mm)	柔度系数 (mm/N)
6.5	所有	0.25
13	1050或更少	0.25
13	1200~1800	0.34
13	1950或更多	0.46
13	所有	0.34
25	所有圆的	0.34
51	所有圆的	0.11

### 6.2.3 国外钢波纹管涵洞结构设计方法分析

国外钢波纹管涵洞的设计方法过于笼统，其不足之处主要是设计时没有充分考虑波形几何尺寸对钢波纹管涵洞力学性能的影响，设计过程中主要考虑了外力和管径两个因素，且将外力假设成均布于管体表面，并局限于将管两侧处的环向压力作为设计控制因素，设计中的相关系数均为经验值。

由于国外波形与国内波形不同，其受力特征相差较大，且国外公路与我国公路波纹管涵洞在荷载组合等方面存在较大差异，不能反映我国公路涵洞结构的实际受力状况，尽管美国公路桥梁设计规范和 AISI 的设计方法为国外公路行业所应用，但在我国很难直接应用，不能盲目套用。

## 6.3 本文钢波纹管涵洞结构设计方法

### 6.3.1 反开槽施工对应的结构设计方法

从本文施工荷载分析，管单侧填土对内力影响较小，管顶填土 0.3m 时出现施工荷载效应集中的现象，但常规施工机械和车辆并不会导致涵管达到强度极限，所以管径不大时施工荷载并不影响设计。

实际上路堤法施工和反开槽施工过程中涵管受力边界条件相差较大。本文通过试验和力学模拟计算,得出了反开槽施工法钢波纹管涵洞的最大有效应力及其位置,以及最大有效应力与荷载、壁厚等的相关关系。这样,就完全可以利用回归的公式等方法计算校核各种场合下的最大有效应力以控制反开槽施工法的结构设计。理论上,柔性基础(换填砂砾等)时,反开槽施工后填土和汽车荷载作用引起的涵管内力比路堤法要大,所以采用反开槽施工对应的结构设计方法更保守。

反开槽施工对应的结构设计可采用三种方法:

方法一:直接模拟现场物理参数和力学边界条件,采用有限元法进行模拟计算,验算控制点的结构内力和挠度,这样虽然繁琐但更具体,有针对性,且适合于任意波形;

方法二:针对基础条件和填土及汽车荷载,对不同管径、不同壁厚的最大有效应力和挠度采用回归公式,验算控制点的结构内力和位移,这样方便但不具针对性,实际边界条件(如路堤法施工)和力学参数可能与本文分析结果相差较大;本文公式仅适合于本文研究的波形(波高 7cm,波距 14cm)和反开槽施工工艺,地基条件相似;

方法三:直接利用本文第三章模拟计算结果得到的推荐壁厚(如下文分析),估算满足不同管径、管顶不同填土高度效应力条件的最小壁厚,这样较简便,但实际边界条件(如路堤法施工)和力学参数可能与本文分析结果相差较大,且不能分析最大有效应力的具体数值;本文推荐壁厚仅适合于本文研究的波形(波高 7cm,波距 14cm)和反开槽施工工艺,地基条件相似。

总体上,方法一适合于详细、具体设计,方法二可用于初步方案设计,方法三可用于可行性分析和方案论证。

### 6.3.2 推荐壁厚

依波纹管涵洞的调研报告知波纹管所用钢材的屈服强度标准值 245 MPa,考虑到波纹管名义厚度与实际厚度的差异和波纹管的腐蚀富裕量,借鉴国外经验综合考虑上述因素取安全系数为 1.5,其容许应力则为 $[\sigma] \geq 164 \text{ MPa}$ 。

由前文计算结果可知:管径 1.5 米的波纹管涵(波形 r30 R30 L140 H70),壁厚 3mm 在管顶填土高度 5 米以下(含 5 米)的最大等效应力无论当填土荷载或施加汽-超 20 后或施加挂车-120 后都没有超过 164MPa,最大值为 118.71 MPa;而填土高度为 10 米时,壁厚 3mm 及 4mm 的最大等效应力超过 164 MPa,壁厚 5mm 时在施加挂车-120 下的最大等效应力为 176.58 MPa,壁厚 6mm 的为 151.33MPa。故对于管径 1.5

米的波纹管涵洞，当填土高度为 5 米以下（含 5 米）时，推荐的管涵壁厚为 3mm；当填土高度达到 10 米时，推荐的管涵壁厚为 6mm。

根据上述分析原则，适当考虑管壁腐蚀富裕量，推荐波纹管涵洞（波形 L140 H70）各管径不同填土高度的壁厚见表 6-5。此外，根据调研情况，部分波纹管涵采用 2.5m 直径，经计算分析，对于管径 2.5 米的波纹管涵洞（波形 r30 R30 L140 H70），当填土高度为 5 米以下（含 5 米）时，推荐的管涵壁厚为 3mm；当填土高度达到 8 米时，推荐的管涵壁厚为 6mm。

表 6-5 不同填土高度的推荐壁厚(mm)

管径 m \ 管顶填土高度 m	0.75	1.0	1.25	1.5	2.0
0.5	3	3	3	3	3
1.0	3	3	3	3	3
2.0	3	3	3	3	3
3.0	3	3	3	3	3
4.0	3	3	3	3	3
5.0	3	3	3	4	4
6.0	3	3	4	4	4
7.0	3	4	4	4	5
8.0	3	4	5	5	5
9.0	3	4	5	5	6
10.0	4	5	5	6	6

### 6.3.3 公路钢波纹管涵洞细部构造及管材要求

根据力学分析及调研情况，采用 A3 或 Q235A 热轧钢板制作波纹管涵洞已经完全能适应公路工程的需求，但应符合“碳素结构钢”GB700—88 和“热轧钢板和钢带的尺寸、外形、重量及允许偏差”GB709-88 的规定。波纹管加工后须采用热浸镀锌等防腐。采用镀锌钢板加工的，在加工后必须进行防腐的二次处理。管材尺寸加工误差应小于 3%。

根据计算分析和涵洞施工及运营的荷载效应，必须对一定波形的钢板厚度作最小厚度要求：即应用于钢波纹管涵洞（波形为 140×70mm）的钢板最小厚度为 3mm。

作为涵洞的重要组成部分，连接螺栓及密封材料应予以重视。连接螺栓不仅要求应达到一定的强度标准，而且应满足一定的防腐要求。密封材料不仅要求密封不渗漏水，而且要具有一定的耐久性。

参考海市企标标准“钢质波纹板通道”Q/J1301-1995 对钢波纹管涵洞的连接材料作以下要求:

(1) 连接用螺栓采用高强度六角螺栓连接副, 直径较大的拼装板式波纹管涵洞应采用  $M20 \times 40 \sim M20 \times 60$  规格 (直径小于 2 米时可采用  $M16 \times 150$  规格), 螺栓和螺母均采用热浸镀锌防腐。

(2) 螺栓材料采用 40Cr, 且应符合“合金结构钢技术条件”GB3077-88 的要求, 螺母材料采用 45 号钢, 材料应符合 GB700-88 的规定, 理化指标应符合“钢结构用高强度大六角头螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件”GB/T1231-91 的 8.8 级规定。

法兰间密封材料, 可采用  $6 \times 6\text{mm}$  方形耐久性能较好的橡胶密封圈, 也可采用  $8 \times 8\text{mm}$  方形石棉盘根密封条。

### 6.3.4 公路钢波纹管涵洞的洞口选择与处理

#### 6.3.4.1 洞口的作用

洞口建筑是由进水口和出水口两部分组成。洞口应与洞身、路基衔接平顺, 并起到调节水流和形成良好流态 (流线) 的作用, 同时使洞身、洞口 (包括基础)、两侧路基以及上下游附近河床免受冲刷。另外, 洞口型式的选定, 还直接影响着涵洞的渲泄能力和河床加固类型的选用。



图6-2 八字式洞口



图 6-3 一字墙式洞口

#### 6.3.4.2 正交洞口类型及适用性

常用的涵洞洞口类型有八字式、端墙式、锥坡式、走廊式和平头式。此外适合于钢波纹管涵洞的还有: 直管延长式、簸箕式。

##### 1. 八字式

八字式洞口建筑为敞开斜置, 两边八字形翼墙墙身高度随路堤的边坡而变。为缩短翼墙长度并便于施工, 将其端部建为矮墙。八字翼墙配合路基边坡设置, 工作量较小, 水力性能好, 施工简单, 造价较低, 因而是最常用的洞口形式。

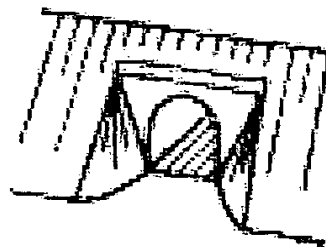


图 6-4 锥坡式洞口

## 2. 端墙式（又称一字墙式）

洞口建筑为垂直涵洞纵轴线，部分挡住路堤边坡的矮墙，墙身高度由涵前壅水高度而定，若兼做路基挡土墙时，应按挡土墙需要的高度确定。端墙式洞口构造简单，但水力性能不好，适用于流速较小的人工渠道或不易受冲刷影响的岩石河沟上。

在人工渠道上，端墙应伸入渠道两侧边坡内一定距离。为防止涡流淘刷，必要时对靠近端墙附近的渠段进行砌石加固。

土质很好的河沟上，当流速很小时，路堤边坡可直接以锥形填土在洞口两侧衔接。但端墙应伸入路堤边坡内一定距离，同时锥形填土需保持稳定。

## 3. 锥坡式

锥坡式洞口建筑，是在端墙式的基础上将侧向伸出的锥形填土表面予以铺砌，视水流被涵洞的侧向挤束程度和水流流速的大小，可采用浆砌或干砌。这种洞口多用于宽浅河流及涵洞对水流压缩较大的河沟。锥坡式洞口圬工体积较大，不如八字式经济，但对于较大较高的涵洞，因这种结构形式的稳定性较好，是常用的洞口形式。

## 4. 平头式

平头式（又称领圈式），需要制作特殊的洞口管节，即在工厂直接预制与路基边坡呈相同坡率的开口斜切的波纹管管节。但它较八字式洞口可省材料 45%~85%，而宣泄能力仅减少 8%~10%。平头式洞口适用于水流通过涵洞挤束不大和流速较小的情况。流速较大时，应对路堤边坡迎水面铺砌加固。

## 5. 直管或直管延长式

采用直管（孔径大、河沟宽）或将涵管适当延长伸出路基边坡以外（孔径小、河沟狭窄），不需对边坡进行处理，根据需要对进出口一定范围内进行铺砌，涵管两侧及顶部一定范围内，边坡回填材料建议采用块、片石，

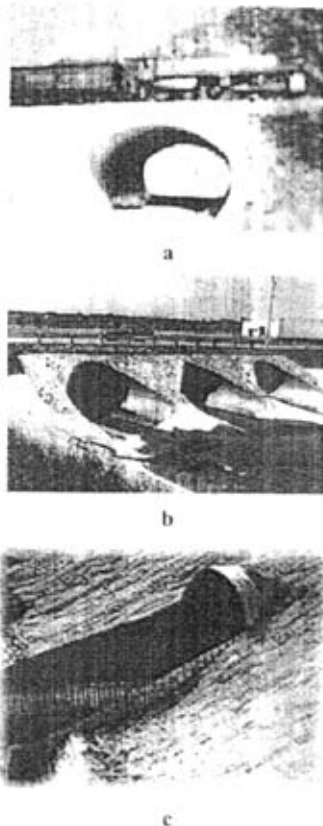


图6-5 平头式洞口



图6-6 直管延长式洞口



以预防水流冲刷危害路基。

## 6. 簸箕式

在工厂直接预制一定尺寸的呈簸箕状的洞口，端部与直管用螺栓连接，洞口一定

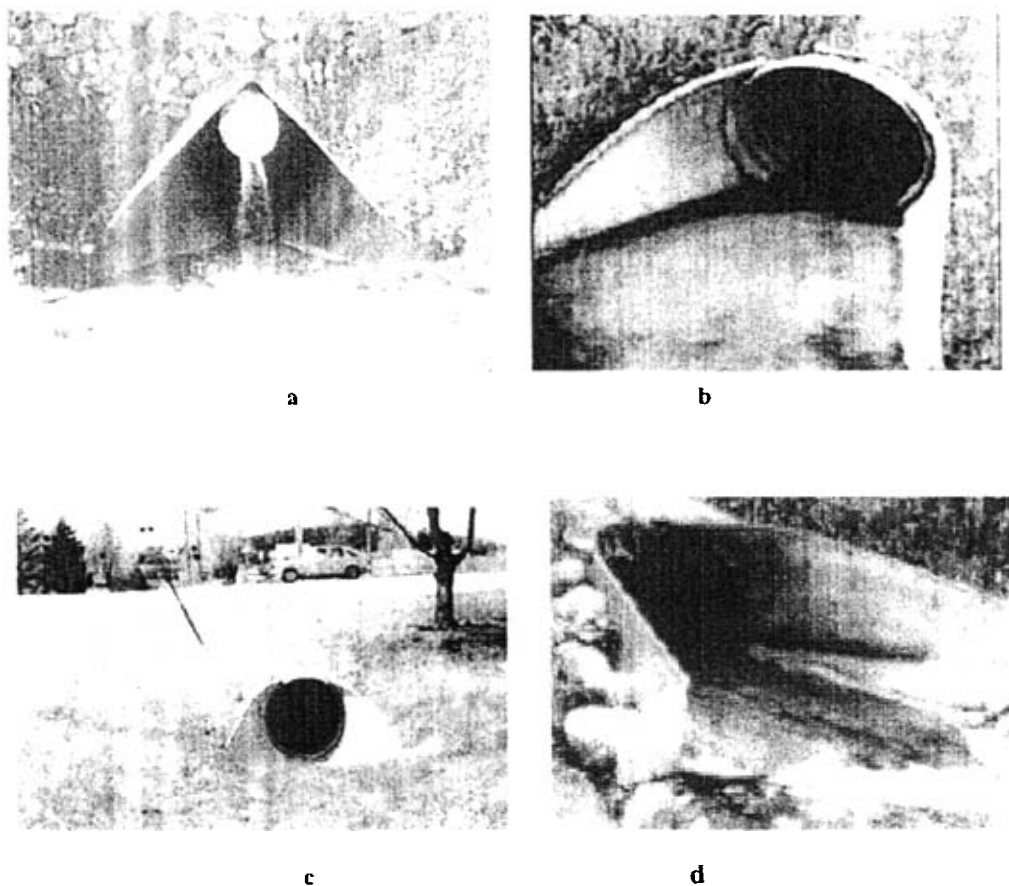


图6-7 簸箕式洞口

范围内应根据需要进行铺砌，适用于流速较大涵洞。簸箕用钢轧制，侧面呈曲面。

各种洞口建筑类型的适用性和优缺点比较见表 6—7。本文结合全国各地的应用状况推荐八字墙和一字墙进出口，并建议在进出口基础为刚性基础时，涵管与进出口采用柔性连接方式，如止水带连接。

表6-7 各种洞口建筑类型的适用性和优缺点比较

洞口形式	适用性	优缺点	备注
八字式	平坦顺直，纵断面高差不大的河沟。配合路堤边坡设置，广泛用于需收纳、扩散水流处。	水力性能较好，施工简单，工程量较少。	
端墙式	平原地区流速很小、流量不大的河沟、水渠。	构造简单，造价低，但水力性能不好。	
锥坡式	宽浅河沟上，对水流压缩较大的涵洞。常与较高、较大的涵洞配合。	水力性能较好，能增强高路堤的洞口、洞身稳定性。但工程量较大。	
平头式	水流过涵侧向挤束不大，流速较小。	节省材料，工艺较复杂，水力性能稍差，洞口径节可预制。	
直管或直管延长式	流速较大的河沟、水渠。管节孔径大适用于河沟宽，采用直管不需延长，孔径小适用于河沟狭窄，适当延长管节。	结构简单，预制方便，对涵洞的加长较为便利，但当孔径较小时洞口渲泄能力相对较差。水力性能不好。	干旱、半干旱地区多用于不长期流水孔径小于河沟渠的涵洞。
簸箕式	流速较大、流量较大的宽浅河沟。	簸箕结构相对复杂，水力性能不好。	簸箕可为波纹状或平板状。

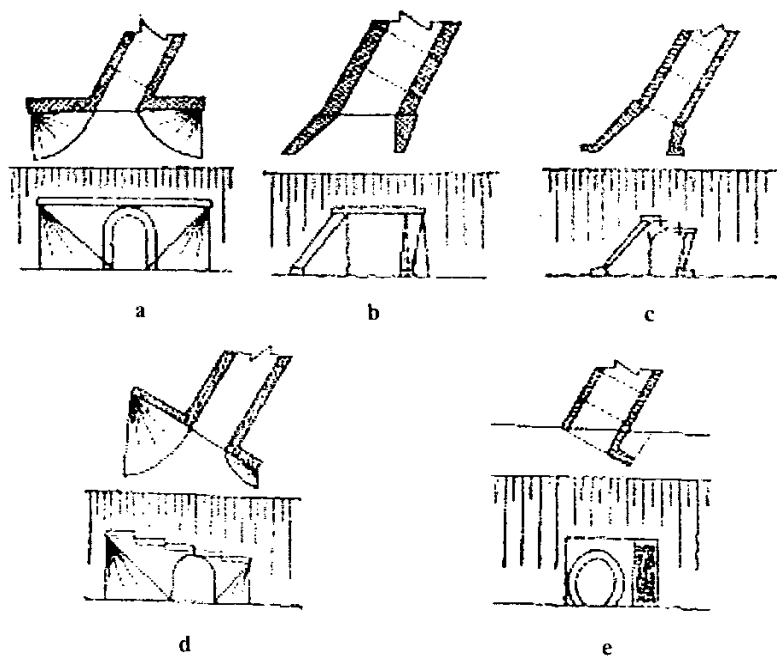


图6-8 斜交涵洞的洞口布置

6.3.4.3 斜交洞口的处理

涵洞与路线相交，可分为正交和斜交两种，常用斜交角 $\alpha$ 为  $75^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $45^\circ$  三

种。

当涵洞与路线斜交时,其洞口建筑所采用的各种形式与正交时基本相同。根据洞身的构造不同,有两种处理方法:(1)斜交斜做(图 6-8a、b)和(2)斜交正做(图 6-8c、d)。当斜交涵管采用平头式洞口时,其突出路基之外的三角台,则以铺砌护道边坡的方法予以加固,如图 6-8e。

本文推荐钢波纹管涵斜交正做,参照美国公路桥梁设计规范斜交正做中歪斜路堤的最小宽度取作涵洞矢高与覆盖层厚度之和的 1.5 倍。

## 6.4 本章小结

1. 国外波纹管涵洞设计方法不能反映我国公路涵洞结构的实际受力状况,不能盲目套用。
2. 根据计算结果,总结分析了反开槽法施工对应的涵管结构设计方法,并首次推荐不同管径不同管顶填土高度时的壁厚。
3. 系统提出了钢波纹管涵细部构造和管材等要求,推荐钢波纹管涵斜交正做,建议采用八字墙和一字墙洞口。

## 第七章 钢波纹管涵洞的施工

### 7.1 钢波纹管涵洞的施工工艺

通过 1997 年~1998 年青藏公路、2001 年青藏铁路钢波纹管试验涵洞的施工,从施工工艺和施工要求等方面进行了研究总结,以参照实施。

#### 7.1.1 工艺流程

钢波纹管涵洞施工工艺流程可分为直接填筑法和反开槽回填法,由于后者涵洞的施工多在路基施工结束后(新建公路)和改建涵洞(养护工程),所以不影响路基施工整体进度,一般后者较为多见。尽管在外力上二者存在一定的差异,但施工工艺相差不大。下面分别予以叙述。

##### 1. 直接填筑法

直接填筑法的工艺流程为:施工前准备——施工放样——设置围堰——排水清淤——平整场地——检测压实度、含水量等——水准测量——基础分层回填——检测压实度、含水量等——水准测量——平整场地——施工放样——拼装管节——检测密水情况及管底纵坡——检测并补救防腐涂层——涵管就位——两侧分层回填——检测压实度、含水量等——管顶分层回填——检测压实度、含水量等——进出口处理。

##### 2. 反开槽回填法

反开槽回填法的工艺流程为:施工前准备——施工放样——开挖涵管及施工场地——平整场地——检测压实度、含水量等——水准测量——基础分层回填——检测压实度、含水量等——水准测量——平整场地——施工放样——拼装管节——检测密水情况及管底纵坡——检测并补救防腐涂层——涵管就位——两侧分层回填——检测压实度、含水量等——管顶分层回填——检测压实度、含水量等——进出口处理。

其中,施工前的准备主要包括以下内容:

A、涵洞施工前应设 1 名管道安装指挥人员,负责指挥吊装及施工人员的现场操作;设置 1~2 名技术人员负责放线、涵管安置等控制关键技术;同时配置适当的辅助人员;

B、涵洞施工前应备齐所需的机械设备及相关工具,如:推土机、挖掘机、压路机、洒水车、水准仪、经纬仪、起吊设备、套筒扳手等;

C、涵洞施工前备齐所需的材料,如:基础回填砂砾材料(经检验合格后方可)、螺栓螺母、石棉(或橡胶)垫等;

D、涵洞施工前应准备涵洞施工过程中试验、检测仪器和设备,落实试验人员;

E、涵洞施工前必须对到现场的涵管节及其附属配件进行检测,一方面检测其结构尺寸是否满足要求(如直径、波形及其参数、管节的法兰孔对应与否),另一方面检测其表面防腐是否达到要求;必要时需在镀锌涂层表面再增涂沥青或其它防腐材料;

F、涵洞施工前施工单位需要通知监理及相关人员到场,并按程序办理施工前的相关手续;

G、涵洞施工前应根据具体情况修筑相应长度的施工便道,并合理组织过往车辆。

涵管拼装工艺流程可为:检查涵管管节——吊装涵管——运输至施工场地——拆除包装——校对涵管进出口等次序——对齐法兰盘及法兰孔——初步上螺栓和螺母——填充橡胶或石棉密水垫——对称拧紧螺栓——均匀在涵管内外侧涂沥青——涵管吊装就位。

### 7.1.2 施工控制技术

波纹管涵的施工关键技术主要有以下几点:

(1) 施工季节应严格控制,防止在冰冻季节施工影响工程质量;

(2) 寒冷冰冻地区对基础换填材料要求较高,特别是对粉粘粒含量应严格控制,以防止产生严重冻胀导致涵管破坏;

(3) 基础与涵管侧面、顶部的填料应分层碾压,压实度达到要求,否则易引起涵管应力集中、涵管变形和涵管两侧的跳车;

(4) 为防止涵管滚动可在压实后的地基表面刻槽呈凹弧形以安放涵管;

(5) 涵管拼装应严格控制涵底纵坡,并加强管节的防腐措施,确保涵洞使用性能和服务寿命满足要求。基础放样时应根据设计要求或工程经验,针对不同地区在涵管纵向适当预留一定的预拱度,如软土地区预拱度可控制在0.5%左右。

## 7.2 施工要求

### 7.2.1 施工基本要求

#### 1. 时间要求

建议波纹管涵施工宜选择在暖季,气温宜高于零度,一般在我国北方宜控制在四月底以后至十一月初;寒冷地区宜控制在五月底以后至十月初,局部极寒冷地区施工季节宜控制在6~9月。

#### 2. 防腐蚀要求

由于波纹管涵洞材料均为金属,对购置的管节和连接螺栓等均需要作防腐处理。此外由于现场施工难免出现局部的防腐涂层存在缺陷和遭到破坏,需要根据具体情况采取一定的补救措施,如增涂涂层。

### 3. 管周材料要求

#### (a) 基础材料要求

由于波纹管涵洞为金属结构,其适应变形能力较强,但其对基础材料要求相对不高,一般不需采用混凝土基础,采取砂砾换填即可。在软土地区(如上海等)、多年冻土地区(如青藏高原)等处采用混凝土基础波纹管涵洞的服务性能不一定比砂砾基础的强。膨胀土、湿陷性黄土等地区基础应根据需要作好隔水处理。

在寒冷地区,基础材料最好采用有一定级配的天然砂砾,最大粒径不宜超过 50mm, 0.074mm 以下粉粘粒含量不得超过 3%,同时满足施工的压实要求、填料最小强度要求、最大粒径要求和地基基础的抗冻要求。季节冻土地区换填深度一般根据当地冻深等确定。关于多年冻土地区波纹管涵基础换填及埋深问题,交通部西部交通建设科技项目《多年冻土地区公路修筑成套技术研究》正在进行专题(子题)研究,目前可暂按换填不小于 1.0m 考虑。考虑到地下水及其影响,建议在南方非冻地区也采用砂砾基础。

一般,在某些地区砂砾材料稀少或砂砾级配较差时,也可换填碎石、砾石或河(山)砂及碎石土,但应满足压实要求、填料最小强度要求、最大粒径要求和抗冻要求。

#### (b) 两侧及顶部回填材料要求

在寒冷地区,两侧及顶部一定范围内(如 0.5~2 米)回填材料要求同基础材料要求。顶部一定范围以外可采用路基填筑材料。非寒冷地区,两侧及顶部回填材料可采用路基填筑材料。

表 7-1 路基填料最小强度要求、最大粒径要求

项目分类		路面底面 以下深度 (m)	填料最小强度 (CBR) (%)		填料 最大粒径 (cm)
			高速公路、一级公路	其它等级公路	
填 方 路 基	上路床	0~30	8	6	10
	下路床	30~80	5	4	10
	上路堤	80~150	4	3	15
	下路堤	150 以下	3	2	15
零填及路堑路床		0~30	8	6	10

## 7.2.2 压实度要求

基础应采用振动压实机械进行分层碾压，碾压时宜根据回填材料的含水量及击实曲线洒水碾压，压实度不小于规范要求；构造物或路基填土高度较高时（如路基填土高度大于 10.0 米），需要针对具体情况对基础承载力作具体要求。具体施工技术要求详见《公路路基设计规范》和《公路路基施工技术规范》。

涵管两侧及顶部其压实度与同一标高路基压实度要求相同，如表 7-2 所示。

表 7-2 路基压实度要求

项目分类		路面底面 以下深度 (m)	压实度(%)		
			高速公路、一级公路	二级公路	三、三级公路
填 方 路 基	上路床	0~30	≥96	≥95	≥94
	下路床	30~80	≥96	≥95	≥94
	上路堤	80~150	≥94	≥94	≥93
	下路堤	150 以下	≥93	≥92	≥90
零填及路槽路床		0~30	≥96	≥95	≥94
		30~80	≥96	≥95	

## 7.2.3 其它要求

波纹管涵施工的其它技术要求有：

（1）波纹管涵应用于公路养护工程时，待涵身及洞口主体部件运至施工现场后，施工单位才能开始拆除旧涵洞的工作，在拆除旧涵洞的同时，抓紧基础材料的备料工作，备料完成，并经检验合格后方可进行基坑的开挖工作。波纹管涵应用于新建公路工程时，在购运涵管的同时可抓紧基础材料的备料和基坑的开挖工作。

（2）涵洞两侧经过低洼积水地带时，需要先设置围堰、抽排积水，必要时还需要清除换填部分淤泥。

（3）进出口可采用由厂家制造的金属波纹管节，有直管和与路基边坡同坡率的斜上开口两种形式；也可根据所在地区的具体情况采用浆砌片石或干砌片石砌筑。一般在寒冷地区，采用金属波纹管节或干砌片石。在其与河床接头处进出口地面及边坡一定范围内应设置双层浆砌片石或干砌片石铺砌，以防止冲刷，并作必要的防渗处理；为防止路基土堵塞涵洞洞口，在洞口与路堤交汇处做一定高度和厚度的浆砌片石或干砌片石墙（也可采用铅丝笼）防护。

（4）有冲刷的涵洞进出口应根据需要设置相应的调治构筑物，同时洞口应按地形条件作必要的处理，防止洞口受冲刷，影响涵洞的泄水能力。

（5）不同填土方式的要求

美国公路桥梁设计规范要求：反开槽回填的槽宽度不应小于管直径加 400 mm，也不应小于管直径的 1.5 倍加 300 mm，以保证提供足够的空间安装和回填压实；路堤法的最小宽度应满足保证对结构的侧向约束，见表 7-3。

表 7-3 路堤法最小宽度

直径 S (mm)	最小填土宽度 (mm)
<600	S, S 为管直径 (mm)
760~3600	600
>3600	1500

#### (6) 最小覆盖层厚度

最小覆盖层厚度，指从刚性路面顶部或从柔性路面的底部量至管顶的覆盖层厚度，美国公路桥梁设计规范要求大于  $S/8 \geq 300$  mm，S 为管直径 (mm)；AISI 设计方法要求大于 30cm。

#### (7) 波纹管涵洞成品允许偏差

根据经验，波纹管涵洞成品允许偏差见表 7-4

表 7-4 波纹管涵洞成品允许偏差

项目	允许偏差	备注
管节长度, mm	0~10	
内(外)直径	不小于设计	
管壁厚度	-1, 正值不限	
顺直度	矢度不大于 0.2%	

### 7.3 反开槽回填法施工技术

根据青藏公路、青藏铁路和 G214 线波纹管涵洞的反开槽施工经验，在波纹管涵洞施工中应注意以下事项。

#### 1. 运输与装卸

涵管在运输装卸过程中，应采取防碰撞措施，避免管节损坏或碰伤防腐层，涵管装卸应采用吊具进行，不允许采用滚板或斜板卸管。

#### 2. 基础

波纹管涵洞基础应结合土质、路基填土材料 and 高度，设置预留拱度。基础采用砂



砾回填时压实度应按重型压实标准达到设计压实要求。

### 3. 波纹管涵成品质量

管节端面应平整并与其轴线垂直；斜交管涵进出水口管节的外端面，应按斜交角度进行处理。

### 4. 敷设

管节安装从下游开始，使接头面向上游；每节涵管应紧贴于垫层或基座上，使涵管受力均匀；所有管节应按正确的轴线和图纸所示坡度敷设。如管壁厚度不同，应使内壁齐平。在敷设过程中，应保持管内清洁无脏物，无多余的砂浆及其他杂物。任何管节的位置设置必须准确，尽可能采用吊装设备敷设到位。在软基上修筑涵管时，应对地基进行处理，方可在上面修筑涵管。

### 5. 接缝

涵管接缝宽度不应大于 10 mm，用具有弹性的不透水材料填塞接缝的内、外侧。当管节采用套环接缝时，应按接缝形式分别采用沥青麻絮、水泥砂浆或沥青砂浆填塞所有接缝，使其稳固、耐久、不漏水。在填塞沥青砂之前，应在管的外表面和套环内套面涂刷沥青涂层，以增强其粘性，并采取措施以免沥青砂外漏。管节接头和进出口不得漏水、渗水。

表 7-5 反开槽法波纹管涵洞施工实测项目

项次	检测项目	规定值或允许偏差	备注
1	基础压实度%	$\geq 95$	
2	轴线偏位 (mm)	50	
3	涵底流水面高程 (mm)	20	
4	涵管长度 (mm)	+100, -50	
5	回填压实度%	$\geq 90$	人跨径 $\geq 95$

### 6. 进出水口

进出水口的沟床应整理顺直，使上下游水流稳定畅通。

### 7. 回填

涵洞处路堤开槽宽度宜不小于 4 倍孔径范围+涵直径，同时按水平分层、对称地按照要求的压实度填筑、夯（压）实。

用机械填土时，涵洞顶上填土（虚填）厚度必须大于 0.3m 时，才允许机械通过。



图 7-1 涵管的运输

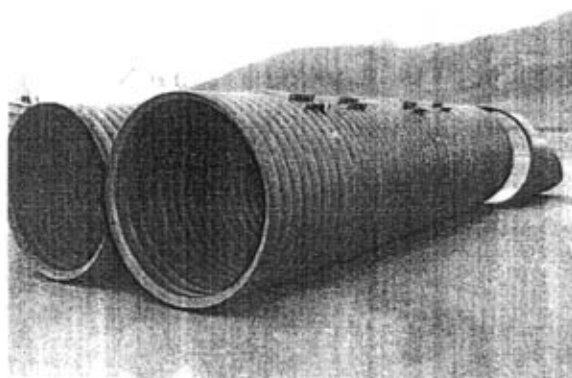


图 7-2 涵管的组装（整体式）



图 7-3 波纹管涵洞的进出口

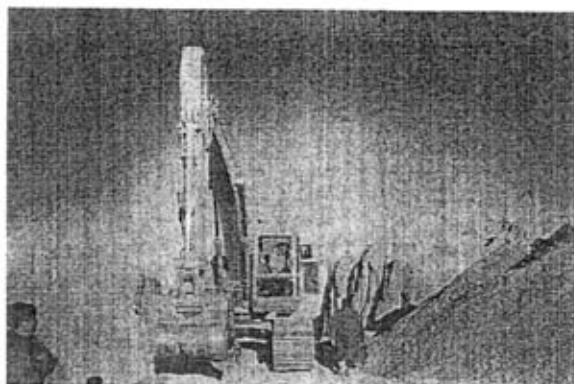


图 7-4 波纹管涵洞基础开挖



图 7-5 基础回填

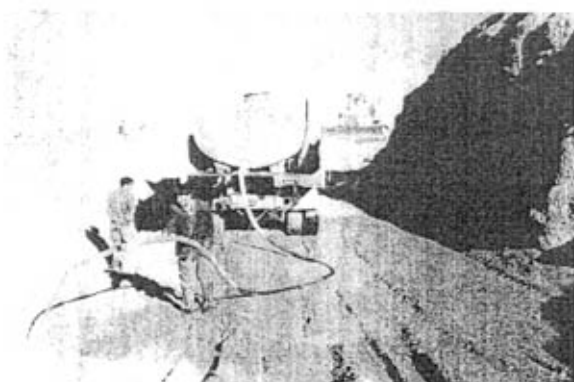


图 7-6 基础洒水压实

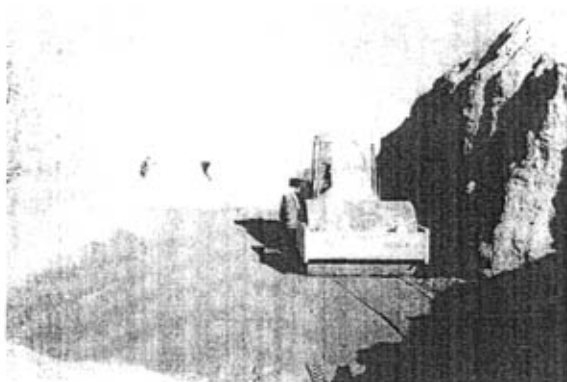


图-7 波纹管涵基础的碾压



图 7-8 基础压实后情况



图 7-9 基础承载力测试



图 7-10 涵管拼装

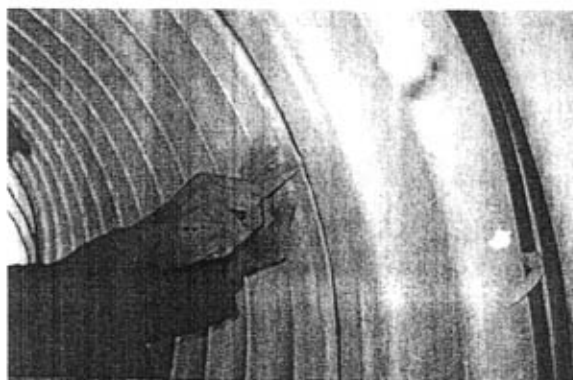


图 7-11 接缝处理

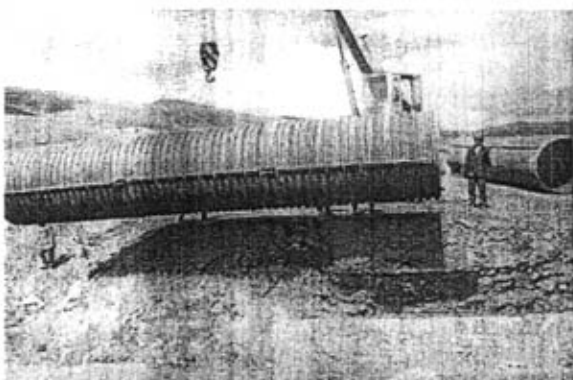


图 7-12 涵管吊装

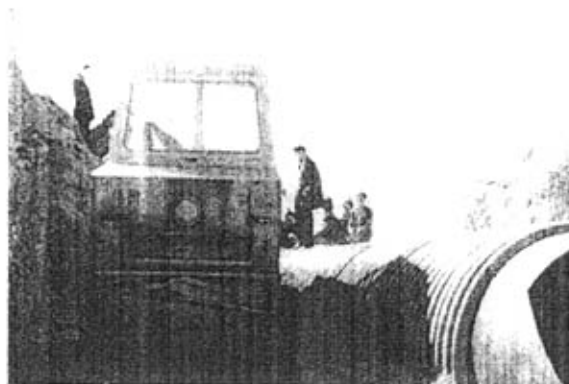


图 7-13 涵侧回填碾压



图 7-14 涵顶回填



图 7-15 涵顶碾压



图 7-16 拱涵的施工

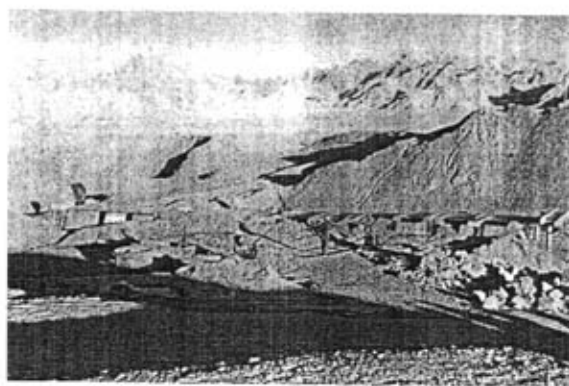


图 7-17 盖板涵的施工

#### 7.4 本章小结

1. 总结了钢波纹管涵洞的施工工艺；
2. 对钢波纹管涵洞的施工提出具体要求；
3. 总结了反开槽回填法施工的相关注意事项。

## 第八章 钢波纹管涵洞的效益分析

### 8.1 钢波纹管涵洞的经济效益

由于建筑材料（主要为水泥、砂、石料）及人工单价、运距等的差异，部分地区（特别是边远地区及水泥、砂、石料缺少地区）的钢波纹管涵洞的实际造价低于钢筋混凝土盖板涵。就青藏公路来说，每道波纹管涵工程造价比同样孔径的钢筋混凝土盖板涵低 4 万多元。

从青海省 2000~2003 年波纹管涵洞实施的经济指标看，波纹管涵洞比同跨径的钢筋混凝土盖板涵洞略高或持平，跨径  $\Phi 1.5\text{m}$  的单价为 3200 元 / m、 $\Phi 2.0\text{m}$  的单价为 4600 元 / m、 $\Phi 2.5\text{m}$  的单价为 6500 元 / m。

在上海新开河试验涵直径 4m，结构基础采用 30 cm 厚 C15 水泥混凝土，两侧用道渣间隔土回填，迎风坡用 25 cm 厚 M7.5 浆砌块石护坡。与同跨径箱涵相比，新开河试验涵节省 5 万元，节约费用 10% 左右。

此外，由于目前生产钢波纹管涵洞的厂家多为转产型，生产规模不大，加工费用高，运输费用也相对较高。如从上海、南京、无锡等地运送钢波纹管涵洞，运费有时占总造价的 1/3 左右。随着钢波纹管涵洞的推广应用和市场的开放、有序以及生产的规模化，钢波纹管涵洞的单价将逐渐降低。

从施工期看，一般钢波纹管涵洞施工工期仅为 3~5 天，相比钢筋混凝土盖板涵、箱涵，节省工期 1 个多月，社会经济效益明显。在多年冻土及寒区，节省工期不仅可以降低成本，而且可以相对延长施工季节，加快工程总进度。多年冻土地区，节省工期还可以大幅度减少因施工引起的传热，减少多年冻土的热干扰。

随着国内钢波纹管涵洞的广泛应用，关于波形和壁厚优化的研究将逐步深入，优化后的波形可以采用相对较薄的结构钢适应相同的填土及汽车荷载标准。相应地，钢波纹管涵洞壁厚的减薄及波形的减小，可以减少用钢量，降低造价。

### 8.2 钢波纹管涵洞的社会效益

相对于钢筋混凝土圆管涵和盖板涵，钢波纹管涵洞的应用，一方面节约了大量的石材、水泥，有利于环保，另一方面建设工期可以大幅度缩短，不仅加快了建设步伐，充分体现了建设工期缩短即相对运营时间增加的经济效应，特别是在局部地区如寒冷地区一年中施工期仅 5~6 个月，这样应用钢波纹管涵洞更具有明显的优势。在抢险、保通工程中应用钢波纹管涵洞更能体现其明显的社会效应和经济效益。



此外，钢波纹管涵洞的应用，不仅带动了钢材加工业和制造业的发展，同时对其它钢结构的研究应用拓展了新的方向。

总之，钢波纹管涵洞具有明显的社会效益和经济效益，具有广阔的应用前景。

## 第九章 结论与建议

### 9.1 结 论

1. 通过试验研究分析,经国内外查新,本文发现了在施工过程中钢波纹管涵洞的受力特征规律如下:

(1) 钢波纹管涵洞的管周径向土压力管底最大,而管下部 1/4 处的径向土压力最小。单侧填土对管内部应力影响不大;当填土高度为 0.3m 时,存在较大的应力集中,将控制设计。

(2) 路中各测点的内侧切向、轴向应力随波形呈周期变化的规律;波峰和波谷处管顶与管侧呈相反的拉压交替规律;在  $45^\circ$  附近存在切向最大应力;管侧波峰和波谷表现出内侧切向和轴向应力呈相反的拉压交替规律。路肩测区各测点由管顶向管底的递进,内侧切向应力在波峰由拉变压,波谷由压变拉,最大应力应变在管顶和管底部(测点 7~9)。

(3) 波谷处外侧切向、轴向应力在管顶为拉应力,管侧为压应力。

2. 可以用薄壳中旋转轴对称壳理论分析波纹管涵洞的力学特征,有限元分析表明本文边界条件②小应变分析的结果与反开槽回填法施工工艺结合较好,精度满足要求。通过有限元分析,首次得到钢波纹管涵洞力学性能的如下规律:

(1) 管内切向与轴向应力应变以及挠度和最大等效应力在恒载作用时随填土高度的增加有呈线性增长的规律,活载作用时随填土高度的增加呈乘幂逐渐减小。

(2) 各管径恒载、活载作用下管侧波峰切向和轴向均受拉;在管顶波峰和管底波谷以及管侧波谷均出现切向轴向呈拉压交替的变化规律。

(3) 管顶波峰与波谷处切向与轴向应力应变随波形呈拉压交替的变化规律。

(4) 波峰和波谷在管顶、管底、管侧均为应力集中处;最大等效应力总体上随管径的增加而增加;随着壁厚增加呈对数减小。最大等效应力和挠度与波形紧密相关。

(5) 与圆管涵相比,波纹管涵的管侧水平位移、挠度和对道路的扰动小,有利于保护路面。

3. 钢波纹管涵洞在国外使用寿命达 50 年以上,国内应用也具有明显的社会效益和经济效益,完全可以适合一般公路,具有广阔的应用前景;对特殊岩土地区,如多年冻土、膨胀土、软土、湿陷性黄土等地区,更具有明显的优越性。

本文针对我国特色首次推荐不同场合的防腐方案：并对钢波纹管涵洞的防腐技术提出具体的要求。

4. 我国公路钢波纹管涵洞设计不能盲目套用国外方法，本文总结出反开槽法施工对应的涵管结构设计方法，可以指导不同阶段的设计；并首次推荐不同管径不同管顶填土高度时的壁厚，系统提出了钢波纹管涵细部构造和管材等要求，推荐了钢波纹管涵进出口。

5. 本文系统总结了钢波纹管涵洞的施工工艺，并对钢波纹管涵洞的施工提出具体要求；总结了反开槽回填法施工的相关注意事项。

## 9.2 创新点

- 1、首次得到关于钢波纹管涵洞力学特征的一系列规律；
- 2、首次针对不同场合推荐采用不同的防腐方案；
- 3、总结出反开槽法施工工艺及其对应的结构设计方法，并首次推荐不同管径不同管顶填土高度时的壁厚，以指导设计。
- 4、系统总结了钢波纹管涵洞的施工工艺。

## 9.3 建议

由于时间的关系，本次研究主要对现有国内钢波纹管涵洞进行了相关研究，且研究侧重在管径小于 2 米的情况。研究发现，国外波形相对国内波形波高和波距均较小，有利于应力分散，但在相同荷载下的竖向变形较大，如何综合考虑应力与变形特征选择波形，有待于进一步研究。

随着钢波纹管涵洞的推广应用，圆形、异型波纹管（板）将逐步应用大跨径的涵洞、通道，建议下阶段对其受力特征进行深入研究。

由于我国各地土壤环境和水文等条件差异较大，相应地钢波纹管涵洞的腐蚀效应也各不相同，建议对钢波纹管涵洞的防腐蚀进行深入的试验研究。

## 参 考 文 献

1. 《沪杭高速公路（上海段）学术论文集（钢质波纹板涵道的试验研究）》
2. 陈吕伟, 波形钢板结构及其在公路工程中的应用, 公路, 2000 年第 7 期, p48-54.
3. 徐芝纶编著, 弹性力学简明教程（第二版）, 高等教育出版社, 2001.
4. 韩强、黄小清、宁建国编著, 高等板壳理论, 科学出版社, 2002.
5. 谢康和、周健编著, 岩体工程有限元分析理论与应用, 科学出版社, 2002.
6. 梁钟琪主编, 土力学及路基, 中国铁道出版社, 1993.
7. 王秉勇, 涵洞顶填土压力的讨论及计算, 铁道工程学报, 2002, 2 (74), 50-54
8. 黄仰贤著, 路面设计与分析, 人民交通出版社, 1998.
9. 刘人怀编著, 板壳力学, 机械工业出版社, 1990
10. 朱照宏、王秉纲、郭大智编著, 路面力学计算, 人民交通出版社, 1985
11. Hu liang , U 型波纹管刚度计算及运用, 上海大学学报（自然科学版）, 1995, 1 (1), 26-35
12. 张起森编著, 道路工程有限元分析法, 人民交通出版社, 1983.
13. 朱伯芳著, 有限单元法原理与应用（第二版）, 中国水利水电出版社, 1998.
14. 贾乃文编著, 塑性力学, 重庆大学出版社, 1992.
15. National Corrugated Steel Pipe Association, Field Performance Evaluation of Polymer Coated CSP Structures in New York, March 2002.
16. American Iron and Steel Institute, Modern Sewer Design(fourth edition 1999),Printed in the United States of America, 251-270.
17. 孙慧珍、胡士信、寥宇平编著, 地下设施的腐蚀与防护, 北京: 科学出版社, 2001。
18. 俞蓉蓉、蔡志章主编, 地下金属管道的腐蚀与防护, 北京: 石油工业出版社, 2001。
19. 《工业建筑防腐蚀设计规范》国家标准管理组、中国工程建设标准化协会防腐蚀委员会、化学工业部建筑设计技术中心站编, 建筑防腐蚀材料设计与施工手册, 北京: 化学工业出版社, 1996。
20. 杨国范编, 刷油防腐蚀绝热工程概预算手册, 北京: 中国建筑工业出版社, 1996。
21. 涂湘湘主编, 实用防腐蚀工程施工手册, 北京: 化学工业出版社, 2000。
22. 【日】渡边邦夫、大泽茂树、内藤龙夫、近角真一著, 钢结构设计与施工, 北京: 中国建筑工业出版社, 2000。
23. American Iron and Steel Institute, Modern Sewer Design(fourth edition 1999),Printed in the United States of America, 251-270.

24. National Corrugated Steel Pipe Association, Field Performance Evaluation of Polymer Coated CSP Structures in New York, March 2002.
25. National Corrugated Steel Pipe Association, Field Performance Evaluation of Polymer Coated CSP Structures in Wisconsin, March 2002.
26. JTJ074-94 高速公路交通安全设施设计与施工技术规范。
27. GB/T18226-2000 高速公路交通工程钢构件防腐技术条件。
28. JT/T333-1997 公路防眩设施技术条件。
29. JT/T281-1995 高速公路波形梁钢护栏。
30. JTJ041-2000 公路桥涵施工技术规范
31. JTJ230-89 《海港工程钢结构防腐蚀技术规定》(试行)
32. GB50316-2000 工业金属管道设计规范
33. GB50268-97 给水排水管道工程施工及验收规范

## 近年来公开发表的论文

1. 李祝龙,丁小军, 赵述曾, 沥青混合料的环境保护对策, 交通运输工程学报, 2004 年第 4 期。
2. 李祝龙,梁乃兴等, 聚合物水泥基材料的耐久性能研究, 交通运输工程学报, 2005 年第 4 期。
3. 李祝龙,梁乃兴等, 聚合物水泥基材料的机理分析, 公路交通科技, 2005 年第 5 期。
4. 李祝龙, 刘百来, 钢波纹管涵洞力学性能现场试验研究, 公路交通科技, 2006 年第 3 期(已录用)。
5. 汪双杰, 李祝龙, 武憨民, 多年冻土地区公路筑路技术研究现状与新课题, 冰川冻土, 2003,vol25, no.4,p471-476
6. 李祝龙, 丁小军, 赵述曾, 浅谈高速公路养护管理体制及对策, 公路, 2002 年第 8 期 P113-117
7. 章金钊, 李祝龙, 武憨民, 冻土路基稳定性主要影响因素探讨, 第一届全国公路科技创新高层论坛论文集公路设计与施工卷, 第一届全国公路科技创新高层论坛 2002 年
8. 赵述曾 李祝龙, 公路建设项目水土保持方案编制的几个关键问题, 公路与自然, 2003 年第 2 期

## 参与编写的专著

1. 《山区高速公路设计指南》路基支挡部分。
2. 目前正在参加《公路几何设计细则》的编写工作。
3. 参加《多年冻土地区公路设计与施工技术》的编写工作。

## 参与的研究项目

2000 年至今, 主要参与《黑北公路岛状多年冻土公路修筑技术研究》, 已经完成, 参与。

2001~2004 年《公路钢波纹管涵洞设计与施工技术研究》(部标准专题研究), 已经完成, 并通过验收, 负责。

2001~2004 年《聚合物改性乳化沥青混合料研究》, 已经完成, 负责。

2002~《高原多年冻土地区公路修筑成套技术研究》, 正在进行, 参与。

2005~《公路钢波纹管涵洞结构计算软件》、《公路环境与景观设计咨询要点》正在进行, 负责。

## 获奖状况

作为主要参与人员完成的《高原多年冻土地区公路修筑成套技术研究》获 2001-2002 年度陕西省科学技术二等奖(陕政函[2003]43 号)。

## 致 谢

本论文是在尊敬的导师戴经梁教授的悉心指导下完成的。戴老师渊博的知识、严谨的治学态度、开阔的视野、为人师表的品学、孜孜不倦的教诲使我终身受益。在日常生活中，戴老师不仅注重提高我的学术水平，还特别关心我和我家人的生活状况，关心我们的身体健康、关心我们的工作，在此，向戴老师致以最诚挚的，最深切的谢意！感谢陈忠达教授、郝培文教授在我学习和生活上的关心、支持和帮助！

在论文完成过程中得到了中交一公院武懿民先生的热心指导和帮助，特别是在他重病的情况下仍悉心指教，帮助我仔细推敲，在此表示衷心的感谢！

在论文完成过程中还得到了中交一公院汪双杰副院长、罗满良处长、章金钊所长赵述曾副总工和周卫、彭志苗、刘戈、张济民、刘毅、马楠等同事和长安大学申爱琴教授、西安工业大学刘百来讲师等的热心帮助，在此表示衷心的感谢！

最后，向多年来一直支持我的家人致以崇高的敬意和衷心的感谢！