

三峡大学

硕士学位论文

大孔径输水暗涵结构优化设计

姓名：梁信宝

申请学位级别：硕士

专业：水利工程

指导教师：张国栋;霍继申

20090501

三峡大学工程硕士学位论文

内 容 摘 要

古运河暗渠洞身段长 435m，分 26 节。过水断面为三孔一联圆拱直墙型式，单孔过水断面为 $6.6 \times 8.2\text{m}$ （宽 $\times$ 高）。其中，穿高速拱涵段长 80m，管节编号 19#~26#，采用浅埋暗挖法施工技术，拱顶覆土厚度为 7.963m，开挖总宽度达 25.6m，拱顶覆土厚度（H）与结构跨度（D）之比为 0.311，属超浅埋。暗挖段土质多为细砂和中细砂，且高速公路上通行的车辆吨位荷载大，是全国此类施工难度最大和开挖宽度最大的项目。

鉴于石太高速为省际交通大动脉，暗涵所穿土层又是厚度不足 8m 稳定性较差的细砂层，为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，保证洞周土层结构的稳定和安全，合理选择暗涵下穿高速设计方案，优选暗挖施工工法，弄清施工过程中一、二衬结构的受力状态，解决施工缝对主体结构的影响等，即成为该工程设计成败的关键。

本论文主要针对大孔径暗涵穿高速结构优化设计的这一难题从以下几个方面进行研究：

（1）暗涵下穿高速公路设计方案优选。分析、比较了水利工程、地铁工程中浅埋土洞常采用的基槽明挖、基坑支护明挖、浅埋暗挖、箱涵顶进、盾构机掘进等施工方法。通过技术可行性、施工场地布置、工程造价等方面的比较，为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，暗涵下穿石太高速推荐方案采用浅埋暗挖法。

（2）洞型结构方案确定。对比分析了永定河倒虹吸穿北京西五环快速路四孔分箱布置、石太铁路涵洞分离式小净距布置型式，结合本工程特点，推荐三孔一联整体拱涵布置方案。

（3）暗挖段拱涵整体受力及施工过程中受力情况。采用《水利水电工程微机程序集》中“G-13 多孔涵洞内力的有限元法分析及配筋计算程序”、SAP84 程序、及“结构力学求解器 V1.5”，对三孔一联整体结构和施工过程中一衬、二衬结构的受力情况进行了计算。结果表明，施工过程中一、二衬结构的内力转换极其复杂，尤其是中洞二衬混凝土提前受力，易导致拱脚拉裂。因施工过程中中孔顶拱、底板轴力接近为零，二衬结构断面及配筋基本由施工过程控制。考虑到临时支撑的不确定因素，建议在中孔顶拱的拱脚部位采用工字钢作拉杆，其间距按每根承担 26t~28t 控制。

（4）暗挖施工工法对比分析。基本是以施工沉降小（安全）为首选原则，对中洞--CRD 法、中洞--侧壁导坑法、边洞法三种施工工法，从施工安全性、施工沉降控制、施工缝型式及数量、施工经济性等方面进行了对比分析。结果表明，选择中洞--侧壁导坑法是最为稳妥的方法，次之是中洞--CRD 法和边洞法。

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

(5) 暗挖施工缝的工程处理。按照中洞侧壁导坑法施工方案,底板、顶拱混凝土横向是分块进行浇筑的,因此在靠近中墙支座处就形成了 8 道竖向施工缝。为加强结构的整体性,建议的处理措施概括为“调位置、留八字、设插筋、埋止水、微膨胀”。

(6) 暗挖施工效果分析。分析了“透水事故”、“管棚水钻法施工”、细砂层等对施工沉降的影响,提出路堤灌浆加固、水玻璃注浆加固等措施。

随着国内基建规模的扩大,更多的高速公路、铁路网的建成使用,对新建水利工程的施工方法提出了更高的要求,传统的基槽明挖设计显然已经不能满足高速公路和铁路正常运营的要求。目前,南水北调中线工程已经进入全面实施阶段,自总干渠引水、东西走向的南水北调配套工程也已开始可行性研究设计。今后,暗涵、倒虹吸类工程穿越高速公路、铁路的工程会越来越多,应用前景广阔。

关键词：大孔径 暗涵 浅埋暗挖 优化

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

Abstract

The covered conduit of ancient canal is 435 meters in length, and is divided into 26 segments. Its flow section is three-hole arch straight wall section one of which is $6.6 \times 8.2(w \times h)$. The covered conduit drilled through highway is 80 meters in length and the number of pipe sections is from 19 to 26. Those parts use the boring excavation method in construction; Thickness of covering soil is 7.963 meters and excavation width is 25.6m, and then the rate of thickness of covering soil and excavation width is 0.311. The soil excavated is fine sand and mid fine sand and the load which is brought from the vehicles in highway is very large. So those parts are the most difficult in construction and the largest excavation width projects.

Since the Shitai Expressway is a interprovincial main artery of communications, and the width of soil layer which is though by covered conduit is less than 8 meters, it is importance to minimize the impact and interference with highway and assure the stable and safe of ambient soil structure. The success of the project depends on selecting the reasonable design proposal for covered conduit drilled through highway and its construction method of optimization, ascertaining the stress of the lining structure in construction process and solving construction joint influencing the main structure.

This paper mainly studied for optimal structure designing of large diameter covered conduit drilled through highway as the following.

(1) Select optimal design proposal of covered conduit drilled through highway. It analyses and compares construction methods used in shallow tunnels of subway engineering and hydraulic engineering which include open excavation foundation trench, open excavation foundation pit support, shallow underground excavation, box culvert jacking, shield machine tunneling, etc. By comparison with technical feasibility, construction site layout and engineering cost, this paper adopts shallow underground excavation for recommended scheme of the covered conduit drilled through highway to minimize the impact and interference with highway.

(2) Select optimal layout scheme, structure and sectional form of the cavern. By comparison with four-hole form of inverted siphon where is in Yongding River and drilled through Beijing West Wuhuan Expressway and separation-type and small-interval Shitai

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

railway culvert, and then combine with the features of this project; it is recommended that use the type of three-hole arch culvert.

(3) The force condition of overall structure of the arch culvert in construction process. By using the finite element method analysis and reinforcement calculation procedure for porous culvert (G-13) of hydraulic and hydroelectric engineering program set, SAP84 and structural mechanic solver V1.5, this paper makes calculation to the force condition of overall structure of three-hole joint and the lining structure in construction process. It is the conclusion that force conversion of the lining structure is very complicated in construction process; especially the secondary lining concrete structure of mid hole is stressed in advance that lead to arch foot ripping. Because axial force of top arch and bottom board of the mid hole is close to zero, the section and reinforcement of secondary lining structure is controlled by construction process. In view of uncertain factor of the temporary supports, it is suggest that I-steel is assigned on the arch foot of top arch of the mid hole and its spaces are to be determined by undertaking 26t~28t per pole.

(4) Select optimal method of tunneling construction. Based on the first principle little settlement of highway, this paper make contrastive analysis among working security, controlling settlement of road surface, the type and number of construction joint and construction economy to CRD method of mid hole, side heading method of mid hole and side hole method. It is the conclusion that the side heading method of mid hole is the best surest method, and the next is CRD method and side-hole method.

(5) This paper analyses and deals with that the tunneling construction influence on the structure. According to side heading method of mid hole, transverse concrete in the bottom board and top arch of the mid hole is poured by block, and so there are eight vertical construction joints nearby the support of mid wall. In order to reinforce integrity of structure, treatment measures recommended are generalized to adjusting position, remaining toe out or toe in, setting insert reinforcement, burying water seal and slight expansion.

(6) Analyze the cause of settlement of road and figure out the counter-measures in construction process. This paper analyzes the influences on settlement of highway by permeability fault and construction of pipe-roof water drilling, and put forward effective measurements such as water glass grouting, embankment grouting, etc.

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

With internal infrastructure scale expanding, more and more highway and railway will be established. Traditional design of open excavation foundation trench is no longer applicable for the requirement of highway and railway, which presents a new challenge to the construction method of new hydraulic engineering. At the present time, the Mid-route of South-to-North Water Transfer Project has entered all-sided implementation and the auxiliary projects of this project have already been do feasibility study and design. In the future, the covered conduits and inverted siphons will have more and more changes to drill the highway and railway and have an extensive future.

Key words : large aperture, covered culverts, shallow underground excavation, optimization

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

三峡大学学位论文独立完成与诚信声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作取得的成果，除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体均已在文中明确方式标明，本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：_____

日 期： _____

选题的依据与意义

南水北调中线京石段应急供水工程（河北段）中，暗渠（亦称暗涵）类建筑物共两座，即古运河暗渠和石津渠暗渠。古运河暗渠洞身段长 435m，需依次下穿省道 S101（一级公路）、古运河和石太高速公路；石津渠暗渠洞身段长 150m，需依次下穿引岗黄输水管线、石阎公路（一级公路）和石津总干渠。

根据以往工程设计经验，对暗渠、倒虹吸类建筑物通常采用明挖方法施工。如石津渠暗渠，通过新挖导流明渠，满足石津灌渠春灌、夏灌和秋灌的要求，同时利用右岸场地修建临时绕行道路。该施工导流、公路导改相结合的方案工程投资较为经济，工期短，施工风险小。

对古运河暗渠而言，因穿越的石太高速公路是晋煤外运的重要通道，如采用传统的明挖方案，就意味着必须修建临时绕行高速公路，平面布置须满足转弯半径和石家庄市石清公路出入口功能等要求。线路设计、赔偿等须与河北石青高速公路有限公司（香港合资企业）进行充分协商；如采用地铁工程中常用的浅埋暗挖、盾构或箱涵顶进等施工方法，技术问题又特别复杂。

鉴于石太高速为省际交通大动脉，暗涵所穿土层又是厚度不足 8m 稳定性较差的细砂层，为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，保证洞周土层结构的稳定和安全，合理选择暗涵下穿石太高速设计方案，优选暗挖施工工法，弄清施工过程中一、二衬结构的受力状态，解决施工缝对主体结构的影响，即成为该工程设计中最突出的技术难点。

本研究项目中，浅埋暗挖三孔一联拱涵单孔过水断面尺寸为 $6.6\text{m} \times 8.2\text{m}$ ，拱顶覆土厚度为 7.963m，开挖总宽度达 25.6m，拱顶覆土厚度（H）与结构跨度（D）之比为 0.311，属超浅埋。暗挖段土质多为细砂和中细砂，且高速公路上通行的车辆吨位荷载大，是全国此类施工难度最大和开挖宽度最大的项目。

本项目旨在通过对已建和在建水利工程、地铁工程的调查研究，汲取工程在设计方面的经验和教训，使勘测规划、设计技术上可行，经济上合理；结合所依托工程实际，采用科学的理论方法，分析施工过程中临时及永久结构的受力状态；解决大孔径暗涵结构设计及浅埋暗挖施工中存在的一些技术难题；本课题应用前景广阔，社会效益和经济效益十分显著。

三峡大学工程硕士专业学位论文

国内外文献资料综述

20 世纪 70 年代初,国外开始新奥法应用于浅埋地层的研究,到了 70 年代末、80 年代初已基本形成了一套完整的技术。但是,由于国外劳力少、工资高,所以并未广泛应用于城市地铁、市政工程设计与施工。德国、日本、美国、法国、意大利、韩国、香港等国家和地区都有新奥法成功应用的实例。日本的城市地铁大多修建在浅埋软弱地层中,主要采用明挖法和盾构法施工,1976 年开始逐渐把山岭隧道施工中应用的新奥法技术移植到城市地铁建设中来。现在,日本在学习我国小导管技术的基础上,将大管棚改成小导管,应用新奥法修建的城市地下工程越来越多,如栗山、大贯、第一原、旭丘、北四番丁等城市隧道,横滨市地铁区间及地铁站等;德国是当今地下工程应用新奥法技术最多的国家。他们不仅在地铁区间隧道建设中应用,而且还在多层、多线路大断面地铁站中广泛应用,如慕尼黑、法兰克福、埃森、波鸿、纽伦堡地铁站等。

表 1 国外浅埋地下工程采用新奥法施工实例

国家	德国	德国	日本	法国	日本	奥地利
工程名称	法兰克福地铁	慕尼黑地铁	成田机场高速铁路隧道	里尔地铁 1 号线	北陆高速公路泊隧道	维也纳地铁
施工年代	1969~1971	1975~1978	1981~1983	1985	1975~1978	1975~1978
地质条件	粘土层、石灰岩和含水沙层,无水	第三纪沙层和泥灰岩,遇水时其塑性和粘土一致	沉积沙土,含地下水	粘土、白垩土、沙等	冲、洪积粘土	第三纪流沙层、粘土层和沙、卵石层
埋深	11~13m	8~26m	8~15m	15m	5~15m	8~20m
断面形式	圆形,直径 6.68m	最大跨度 11.5m,最大高度 7.5m	最大跨度 11.5m,最大高度 7.5m	最大跨度 6.8m,最大高度 5.8m	最大跨度 11.4m,最大高度 8.6m	最大跨度 8.5m
施工方法	全断面台阶法施工,使用反铲挖掘机	双侧壁导洞法,使用掘进机及反铲挖掘机	分部开挖,使用小型掘进机、反铲挖掘机带式输送机,采用超前管棚支护	上、下台阶分部开挖(两台掘进机),弃渣用泵送至洞外	超前侧壁导洞及分部开挖法,环形部分用人工开挖,核心部分使用反铲挖掘机	侧壁导洞法,使用掘进机及反铲挖掘机,必要时使用拱部插板支护
主要支护形式	锚杆,挂网,喷混凝土,钢拱架,钢筋混凝土内衬	锚杆,钢支撑或网构拱,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	锚杆,喷混凝土,钢支撑,钢筋混凝土内衬	钢支撑加背板,钢筋混凝土内衬	锚杆,喷混凝土,钢支撑,钢筋混凝土内衬	喷混凝土,钢支撑,钢筋混凝土内衬
长度	420m	60m	410m	1240m	770m	70~80m

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

我国在 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始将新奥法原理应用于地下工程施工，80 年代中期开始系统研究新奥法在浅埋较软弱地层中的应用。

“浅埋暗挖技术”是在借鉴外国成功经验，以及我国山岭隧道硬岩新奥法施工经验的基础上，结合中国国情和地质与水文地质情况，由王梦恕同志（现任工程院院士）主持创造的地下工程施工技术。它包括小导管超前支护技术、“8”字形网构钢拱架设计与制造技术、正台阶环形开挖留核心土施工方法以及相应的监测仪器、监测方法和用变位进行反分析计算方法。它强调了新的施工要点，突出时空效应对防塌的重要作用，提出在软弱地层必须快速施工的理念，于 20 世纪 80 年代中期在大秦线军都山铁路隧道双线进口黄土试验段研究成功。之后，1986 年 5 月~1987 年 5 月，在北京地铁复兴门折返线工程设计与施工中，首次应用“浅埋暗挖技术”并获得成功。随后，这项技术又在北京地铁复兴门至西单区间进行了三拱两柱跨度达 21.7m 的地下车站的设计、施工和试验，并获得成功。

由于浅埋暗挖技术取得了巨大的经济效益和社会效益，北京市科委和铁道部科技司曾于 1987 年 8 月共同组织了成果鉴定会，与会专家和各级领导对这项技术进行了认真的讨论和评价，并对该技术方法的名称进行了讨论，否定了“软弱地层新奥法”、“中国特色新奥法”、“北京地铁浅埋暗挖法”等名称，最后确定取名“浅埋暗挖法”。

采用浅埋暗挖法施工的地下工程包括：北京原国家计委地下停车场、北京首钢地下运输廊道、北京城市地下热力与电力管道、北京长安街地下过街通道、北京地铁复一八线区间和三个大型车站、北京地铁 5 号线、深圳地下过街通道、深圳地铁、广州地铁、南京地铁、天津地铁工程等。

浅埋暗挖施工技术在水利工程中应用较少，已知的有：引滦入津水资源保护暗渠穿越大秦铁路工程、南水北调中线（北京段）永定河倒虹吸穿西五环快速路工程、南水北调中线（北京段）穿西四环暗涵工程、南水北调中线（北京段）穿顾八路、大件路隧洞工程、山西引黄北干（黄河—大同）工程等。

南水北调中线工程是一项跨流域、跨省市的特大型水利工程，其工程规模属世界之最。京石段应急供水工程中，暗渠、倒虹吸、涵洞类大型河渠交叉建筑物共 23 座，其中，三孔一联拱涵最大孔径为 $6.6 \times 8.2\text{m}$ （宽 $\times$ 高），三孔一联箱涵的最大孔径为 $6.6 \times 7.8\text{m}$ （宽 $\times$ 高）。国内对大孔径暗涵结构设计，尤其是暗渠穿高速公路设计方案优选、洞室布置及断面型式优选、顶拱矢高及地基模型对拱涵内力的影响、拱涵施工过程受力分析、暗挖施工工法优选及其对主体结构的影响等方面的研究，尚无先例。

三峡大学工程硕士学位论文

表 2 我国部分地下工程采用浅埋暗挖法施工实例

工程名称	军都山隧道出口段	北京地铁复兴门折返线	北京地铁西单车站	原国家计委地下停车场	狗磨湾隧道出口段	高碑店污水处理厂排水隧道	北京长安街过街通道
施工年代	1984~1985	1986~1987	1990~1992	1992~1993	1992	1991~1992	1994
地质条件	细砂层、黄土	第四纪粉细沙层	第四纪粉细沙层	粉细沙、圆砾	石英云母片岩,节理发育,风化严重	亚粘土及第四纪粘土、沙粘土,高地下水位	人工填土,沙粘土
埋深	3~12m	9~11m	6~21m	2.8m	4~15m	0.8~2.8m	0.8~1.0m
断面形式	最大跨度 12.0m,最大高度 11.0m	最大跨度 14.6m,最大高度 8.0m	三拱两柱,最大跨度 26m,最大高度 13.5m	最大跨度 13.0m,最大高度 13.2m	最大跨度 21.0m,最大高度 8.6m	三拱两柱,最大跨度 15.1m,最大高度 4.0m	最大跨度 11.5m,最大高度 4.0m
施工方法	正台阶法	正台阶法,侧壁导洞超前法	眼镜工法	CRD 工法	眼镜工法	中洞法,侧洞法	CRD 工法
主要支护形式	超前小导管,钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	超前小导管,钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	超前管棚,钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	超前小导管,钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	锚杆,钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	超前小导管,钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬	钢筋网,网构钢架,喷混凝土,钢筋混凝土内衬
长度	600m	358m	260m	104.8m	230m	95m	50m

本研究项目中,浅埋暗挖三孔一联拱涵单孔过水断面尺寸为 $6.6\text{m} \times 8.2\text{m}$,拱顶覆土厚度为 7.963m ,开挖总宽度达 25.6m ,拱顶覆土厚度(H)与结构跨度(D)之比为 0.311 ,属超浅埋。暗挖段土质多为细砂和中细砂,且高速公路上通行的车辆吨位荷载大,是全国此类施工难度最大和开挖宽度最大的项目。

大孔径输水暗涵结构优化设计,对解决大孔径暗涵结构设计及浅埋暗挖施工中存在的一些技术难题,具有重要的意义。

1 绪论

1.1 问题的提出

南水北调中线京石段应急供水工程（河北段）中，暗渠类建筑物共 2 座，即古运河暗渠和石津渠暗渠。古运河暗渠洞身段长 435m，需依次下穿省道 S101（一级公路）、古运河和石太高速公路；石津渠暗渠洞身段长 150m，需依次下穿引岗黄输水管线、石阎公路（一级公路）和石津总干渠。

根据以往工程设计经验，对暗渠、倒虹吸类建筑物通常采用明挖方法施工。如石津渠暗渠，通过新挖导流明渠，满足石津灌渠春灌、夏灌和秋灌的要求，同时利用右岸场地修建公路临时绕行道路。该施工导流、公路导改相结合的方案工程投资较为经济，工期短，施工风险小。

对古运河暗渠而言，因穿越的石太高速公路是晋煤外运的重要通道，如采用传统的明挖方案，就意味着必须修建临时绕行高速公路，平面布置须满足转弯半径和石家庄市石清公路出入口功能等要求。线路设计、赔偿等须与河北石青高速公路有限公司（香港合资企业）进行充分协商；如采用地铁工程中常用的浅埋暗挖、盾构或箱涵顶进等施工方法，技术问题又特别复杂。

鉴于石太高速为省际交通大动脉，暗涵所穿土层又是厚度不足 8m 稳定性较差的细砂层，为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，保证洞周土层结构的稳定和安全，合理选择暗涵下穿石太高速设计方案，优选暗挖施工工法，弄清施工过程中一、二衬结构的受力状态，解决施工缝对主体结构的影响，即成为该工程设计中第一个突出的技术难点。

1.2 浅埋暗挖施工技术在水利工程中的应用与发展

浅埋暗挖施工技术在水利工程中应用较少，已知的有：引滦入津水资源保护暗渠穿越大秦铁路工程、南水北调中线（北京段）永定河倒虹吸穿西四环快速路工程、南水北调中线（北京段）穿西四环暗涵工程、南水北调中线（北京段）穿顾八路、大件路隧洞工程、山西引黄北干（黄河—大同）工程等。

2005 年 4 月 3 日，由中铁十九局集团华南公司施工的天津市引滦入津水源保护工程暗挖段，成功穿越大秦铁路。暗渠过水断面为三孔 $4.3\text{m} \times 4.3\text{m}$ 平顶直墙混凝土框架结构。为确保大秦铁路每天 92 对重载列车的行车安全，采用浅埋暗挖管棚施工技术，对整个导洞分为 10 个小导洞进行分别开挖封闭，管棚结合侧壁小导管超前支护与工字钢支撑，网喷混凝土初期支护，二衬箱体分段分块浇筑混凝土，形成整体结构后再进行套衬施工；在安全监控上，对路基进行定时定点量测的动态管理，随时对道床、轨道进行提高和加固，路基沉降始终处于受控状态。88m 长暗挖段穿越重载

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

路基大秦铁路,被列为全线的咽喉工程。大管棚管径 299mm,采用连续夯进式施工。其暗挖段之长,管棚直径之大,在国内尚属首例。

2005 年 4 月 6 日,由中铁十六局集团六公司承建的南水北调中线(北京段)永定河倒虹吸穿西五环快速路浅埋暗挖工程全部贯通。永定河倒虹吸穿北京西五环工程西起永定河左堤堤脚,东至五环路匝道,全长 76m,与五环路夹角 82.90° 。采用四孔钢筋混凝土方涵分箱布置,单孔过水断面尺寸为 $3.8\text{m}\times 3.8\text{m}$,开挖尺寸为 $5.6\text{m}\times 5.6\text{m}$ 。五环主路路面至结构拱顶平均高度为 11.9m。为保证北京五环路的安全,隧道开挖时采用单端进洞,每一单洞采用上、下台阶开挖,四孔箱涵采用跳格开挖方式进行。采用超前小导管注改性水玻璃浆,并结合格栅钢架、锚杆、钢筋网、喷混凝土作为初期支护,并进行二次全断面混凝土衬砌。

2007 年 10 月 10 日,由中铁十九局集团华南公司承建的南水北调中线(北京段)穿西四环暗涵四标主体工程胜利竣工。西四环暗涵是穿越北京市城区的大型建筑物,上接卢沟桥暗渠,下接团城湖明渠,全长 12.64km,为总干渠末端的控制性工程。暗涵进口位于京石高速路永定路立交桥西南角大井村附近,穿越永定路立交及京石高速路后沿高速路北侧向东北约 1km 由岳各庄桥进入四环路下,沿四环路向北约 11km 由四海桥处脱离四环路北行约 500m 与团城湖明渠相接。输水设计流量为 $30\text{m}^3/\text{s}$,加大流量为 $35\text{m}^3/\text{s}$ 。采用双管低压输水方案,工程由 1.4km 长 2 孔 $3.8\text{m}\times 3.8\text{m}$ 明挖施工方涵、185m 长 2 孔 $3.8\text{m}\times 3.8\text{m}$ 暗挖施工方涵、10.96km 长 2 孔 $\phi 4.0\text{m}$ 浅埋暗挖圆涵及出口闸四部分组成。暗挖段圆涵为复合式衬砌结构,采用浅埋暗挖法修建,正台阶法开挖,初期支护为格栅钢架加钢筋网喷射砼,二衬为模筑钢筋砼,初支二衬之间铺设连续防水板。创下了暗涵结构顶部与地铁结构距离仅有 3.67m,地铁结构最大沉降值不到 3mm 的纪录。

2007 年 10 月 25 日,由葛洲坝集团第八工程公司承建的南水北调中线(北京段)穿越顾八路、大件路的浅埋暗挖隧洞实现全线贯通。北京段惠南庄至大宁段 PCCP 管道工程,在房山区羊头岗交叉穿越顾八路、大件路。顾八路、大件路属燕山地区对外的交通要道,车流量大,暗挖隧洞施工面临塌方危险,且两路地下管线复杂,地基渗水多,施工难度大。

黄河——大同(引黄北干)工程,采用浅埋暗挖法施工,设计流量 $25\text{m}^3/\text{s}$,单孔过水断面为 $4.1\text{m}\times 4.1\text{m}$ 。

目前,南水北调中线工程已经进入全面实施阶段,自总干渠引水、东西走向的南水北调配套工程也已开始可行性研究设计。今后,暗渠、倒虹吸类工程穿越公路、铁路的工程会越来越多,应用前景广阔。

本研究项目中,浅埋暗挖三孔一联拱涵单孔过水断面尺寸为 $6.6\text{m}\times 8.2\text{m}$,拱顶

覆土厚度为 7.963m，开挖总宽度达 25.6m，拱顶覆土厚度（H）与结构跨度（D）之比为 0.311，属超浅埋。暗挖段土质多为细砂和中细砂，且高速公路上通行的车辆吨位荷载大，是全国此类施工难度最大和开挖宽度最大的项目。

大孔径输水暗涵结构优化设计，对解决大孔径暗涵结构设计及浅埋暗挖施工中存在的一些技术难题，具有重要的意义。

1.3 研究内容

- (1) 暗涵下穿高速公路设计方案；
- (2) 暗涵洞型结构方案确定；
- (3) 暗涵结构计算分析；
- (4) 暗挖施工工法对比分析；
- (5) 暗挖施工缝的工程处理；
- (6) 暗挖施工效果分析。

2 工程概况及基本资料

2.1 京石段应急供水工程概况

南水北调中线京石段应急供水工程南起石家庄附近的古运河枢纽，北至北京市团城湖，线路总长 307.5km。其中河北省境内长度 227.4km，为明渠输水；北京市境内长度 80.1km，为管涵输水。

京石段应急供水工程（河北段）起点为古运河枢纽，终点为北拒马河中支南岸。渠道途经石家庄市的正定、新乐；保定市的曲阳、定州、唐县、顺平、满城、徐水、易县、涞水、涿州等 11 个市县。总干渠设计流量为 $220\text{m}^3/\text{s}\sim 50\text{m}^3/\text{s}$ ，设计水位为 $76.408\text{m}\sim 60.30\text{m}$ ，总水头差为 16.108m 。渠道沿线交叉建筑物共 442 座，其中控制建筑物 37 座、大型河渠交叉建筑物 23 座、隧洞 7 座、左岸排水建筑物 105 座、渠渠交叉建筑物 29 座、公路交叉建筑物 240 座（公路桥 131 座、生产桥 109 座）、铁路交叉建筑物 1 座。

京石段应急供水工程（北京段）自北拒马河中支南岸，输水线路北穿房山城区西北关，南穿京广铁路至大宁水库副坝下游斜穿永定河，于卢沟桥镇的东侧穿京西编组站等铁路环后沿京石高速公路南侧往东，在大井村西穿京石公路往北进入西四环快速路，直至终点团城湖。采用 PCCP 管道和暗涵输水。设计条件为泵站加压输水，设计流量为 $50\text{m}^3/\text{s}\sim 30\text{m}^3/\text{s}$ ，无泵站加压时的自流规模为 $20\text{m}^3/\text{s}$ 。

2.2 古运河枢纽工程概况

古运河枢纽工程位于河北省石家庄市西北郊区，是总干渠上的一座大型河渠交叉建筑物。枢纽工程由古运河暗渠、田庄分水闸及渠道三部分组成。防洪标准为 100 年一遇洪水设计、300 年一遇洪水校核。

(1) 古运河暗渠工程

总干渠在古运河与太平河汇合口下游约 50m 处穿越古运河，同时穿越省道 S101（石家庄市北防洪堤）及石太高速公路，交叉建筑物型式为穿河暗渠。设计流量为 $170\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量为 $200\text{m}^3/\text{s}$ 。

暗渠进口桩号为 0+090.7，出口桩号为 0+657.7，建筑物总长 567m，由进口渐变段、进口闸室段、洞身段、出口闸室段及出口渐变段五部分组成。

①进口渐变段

进口渐变段长 40m，采用钢筋混凝土直线扭曲面，边坡系数 $2.5\sim 0$ ，底宽 $14\text{m}\sim 22.2\text{m}$ ，底板高程为 70.403m 。

②进口闸室段

进口闸室段长 22m，为三孔一联开敞式闸室结构，单孔净宽 6.6m，底板高程为

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

70.403m。闸室设有交通桥、人行便桥及排架。进口闸室内设有 3 扇工作门和 1 扇检修门。工作闸门采用露顶式弧形钢闸门，弧门半径为 9m。工作闸门启闭机采用后拉式液压启闭机，共 3 台，容量为 $2 \times 250\text{kN}$ 。检修闸门为平面叠梁门，平时放置于门库中，采用 $2 \times 100\text{kN}$ 电动葫芦起吊。

③洞身段

洞身段长 435m，分 26 节。过水断面为三孔一联拱形结构，单孔过水断面为 $6.6 \times 8.2\text{m}$ （宽 $\times$ 高）。进口洞底高程为 70.403m，出口洞底高程为 70.337m。

因暗渠顶部覆土厚度不同，采用三种断面尺寸：

省道 S101 段拱涵，长度为 80m，管节编号 1#~4#。拱涵顶板厚 1.3m，底板厚 1.7m，边墙厚 1.4m，中墙厚 1.2m；

河道段拱涵，长度为 275m，管节编号 5#~18#。拱涵顶板厚 1.1m，底板厚 1.4m，边墙厚 1.3m，中墙厚 1.2m。

穿高速暗挖段拱涵，长度为 80m，管节编号 19#~26#。拱涵顶板厚 1.2m，底板厚 1.6m，边墙厚 1.4m，中墙厚 1.2m。采用浅埋暗挖法施工。

④出口闸室段

出口闸室段长 10m，为三孔一联开敞式闸室结构，单孔净宽 6.6m，底板高程为 70.337m。闸室内设有交通桥及排架。出口闸室内设有 2 扇检修门，平时放置于门库中，采用 $2 \times 100\text{kN}$ 电动葫芦起吊。

⑤出口渐变段

出口渐变段长 60m，采用钢筋混凝土直线扭曲面，边坡系数 0~2.5，底宽 22.2m~11m，底板高程为 70.337m~70.244m。

(2) 田庄分水闸工程

田庄分水闸布置在古运河暗渠进口，闸室中心线与总干渠中心线交点桩号为 0+039.7。交点距上游弯道末端 39.7m，距暗渠进口渐变段 51m。分水角度为 60° ，分水流量为 $65\text{m}^3/\text{s}$ 。

建筑物总长 129.0m，由进口圆弧翼墙段、闸室段、消力池段、出口渐变段、下游渠道防护段五部分组成。

(3) 渠道工程

暗渠上游渠道长 90.7m，设计流量为 $220\text{m}^3/\text{s}$ ，加大流量为 $240\text{m}^3/\text{s}$ 。为全挖方渠道，横断面型式采用梯形断面，渠底宽 14.0m，设计水深 6.0m。

一级马道以下渠深 8.0m，边坡为 1:2.5，过水断面结构层依次为 8~10cm 厚现浇混凝土板衬砌、复合土工膜、4cm 厚聚苯乙烯泡沫板。

一级马道以上每增 6.0m 设一级马道，边坡为 1:2，采用六角混凝土框格植草护

三峡大学工程硕士专业学位论文

坡。右堤一级马道兼作运行维护道路。

2.3 古运河水文基本资料

古运河上游由古运河和太平河两大支流组成。古运河发源于黄壁庄水库副坝下游附近，太平河发源于鹿泉市西南的太行山浅山区，古运河与太平河在田家庄西北约 1km 处汇合，汇合口以上古运河流域面积为 117.3km^2 ，太平河流域面积为 131.1km^2 ，汇合后仍称古运河。至田家庄北与石津渠汇合，以下分为两支，南支为小运河，流入市区，北支古运河与石津渠合二为一，至赵陵铺又与石津渠分开，在柳林铺穿过京广铁路，并于滹沱河铁路桥下游约 2km 处汇入滹沱河。古运河交叉断面洪水成果见表 2-1。

表 2-1 古运河交叉断面洪水成果表

标准	洪峰流量 (m^3/s)	现状河道洪水位(m) (已整治,未展堤)		规划河道洪水位(m) (已整治+展堤)		备注
		右岸	左岸石太高速北	右岸	左岸石太高速北	
300	2622	88.00	88.00	87.70	87.70	
200				87.24		
100	1721	86.90	87.30	86.67	87.05	
50	1371			86.29	86.69	
20	876			84.96	85.43	
10	550			84.63	84.66	

2.4 古运河暗渠工程地质

2.4.1 地层岩性

在勘探深度范围内岩性为第四系松散层，由老至新分述如下：

(1) 第四系上更新统下段($al + plQ_3^1$)，下段分为三大层：

①下部为砾石层，层厚大于 17m，局部为砾砂及中细砂层；

②中部为粘性土层，主要为壤土及砂壤土，层厚 2.3m~9.8m；

③上部为砂层，以中砂为主局部夹细砂、砾砂透镜体，中间夹一层较稳定的薄层壤土，层厚 7.1m~14.5m。

(2) 第四系上更新统中段($al + plQ_3^2$)

岩性以黄土状壤土为主，夹黄土状砂壤土，层厚 0.6~9.9m。

(3) 第四系全新统(Q_4)

①壤土(alQ_4^2), 厚度 0.2~0.5m;

②淤泥(alQ_4^3), 厚 0.5m;

③人工填土(rQ), 包括人工筑路素填土和人工废弃碎石土, 分布于石太高速公路、防洪堤、107 国道副线, 左岸下游漫滩、杜北砖厂内、右岸奶牛场附近也有零星分布。

2.4.2 地质结构

工程区由第四系松散层组成, 为粘性土、砂性土、碎石土组成的土体多层结构。根据地层时代、岩性及土体空间分布特征, 将建筑物区地层划分为 10 个工程地质单元, 分述如下:

第①工程地质单元: 黄土状壤土($al + plQ_3^2$), 层厚 0.6m~8.6m, 层底高程 74.92m~81.0m, 局部夹薄层粘土。

第②工程地质单元: 黄土状砂壤土($al + plQ_3^2$), 层厚 0.6m~6.5m, 层底高程 74.32m~78.77m。

第③工程地质单元: 中砂($al + plQ_3^1$), 层厚 2.5m~9.8m, 层底高程 65.1m~71.7m。

第④工程地质单元: 壤土($al + plQ_3^1$), 层厚 0.5m~5.85m, 层底高程 67.4m~71.32m。

第⑤工程地质单元: 细砂($al + plQ_3^1$), 层厚 2.15m~12.5m, 层底高程 64.78m~69.37m, 以透镜体形式存在。

第⑥工程地质单元: 中砂($al + plQ_3^1$), 层厚 1.75m~7.2m, 层底高程 62.89m~67.62m。

第⑦工程地质单元: 壤土($al + plQ_3^1$), 层厚 1.1m~9.6m, 层底高程 57.1m~65.86m, 局部夹粘土透镜体及薄层细砂透镜体。

第⑧工程地质单元: 砂壤土($al + plQ_3^1$), 层厚 1.0m~6.0m, 层底高程 57.78m~62.27m, 以透镜体形式存在。

第⑨工程地质单元: 细砂($al + plQ_3^1$), 层厚 2.5m~6.8m, 层底高程 56.26m~60.64m。

第⑩工程地质单元: 砾石($al + plQ_3^1$), 层厚度大于 17m, 局部砾石层上部有砾砂透镜体。

古运河暗渠轴线工程地质剖面图见图 2.1。

2.4.3 土的物理力学性质

各地质单元物理力学性质指标主要依据室内试验、标贯、动探测试成果综合分析后确定, 见表 2-2。

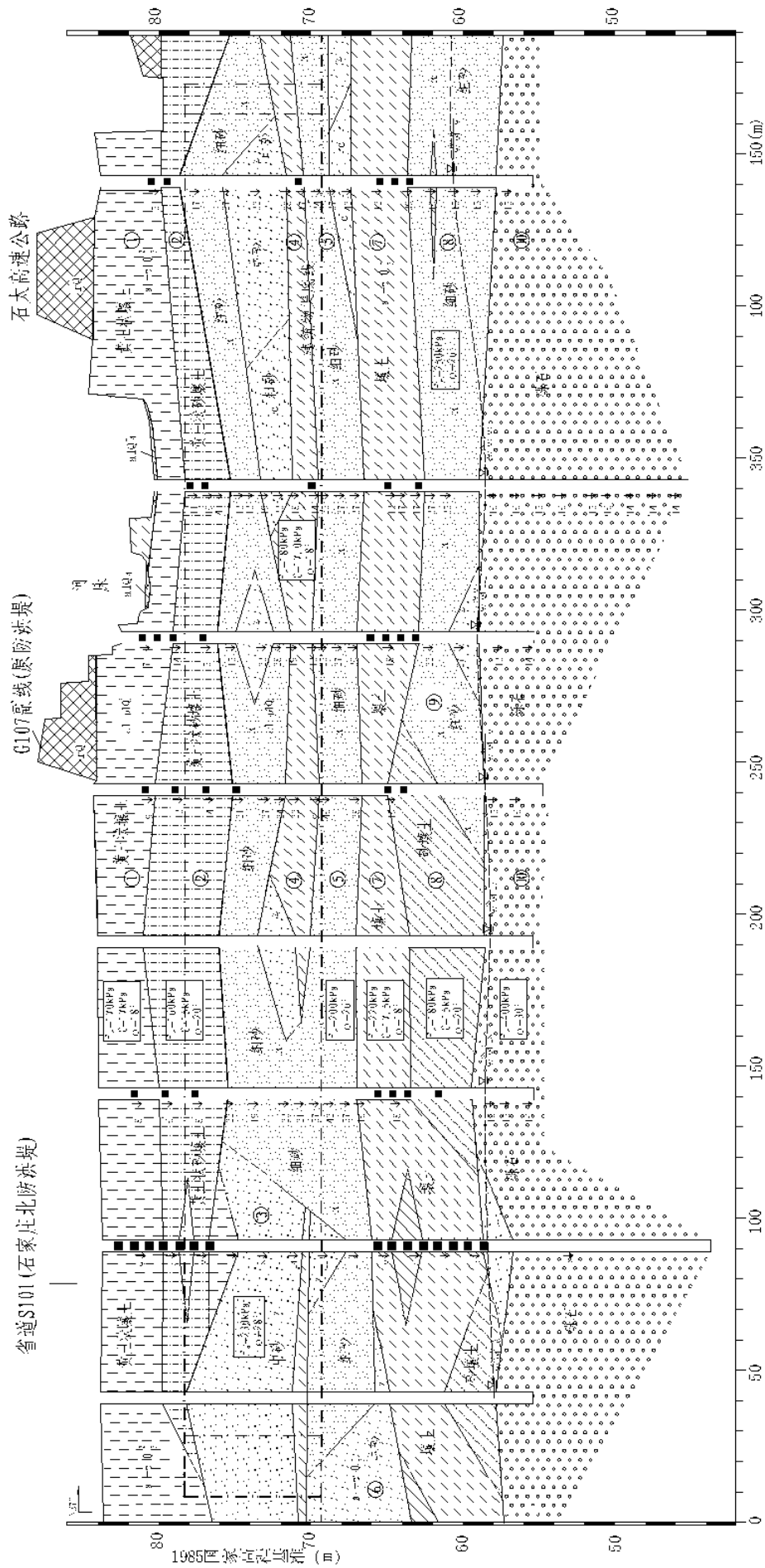


图 2.1 古运河暗渠轴线工程地质剖面图

表 2-2 土体物理力学性质指标建议值表

地质时代	地质时代	岩性	物理性质							力学性质				承载力建议值		综合边坡坡比
			含水率	干密度	孔隙比	饱和度	塑性指数	液性指数	渗透系数	压缩系数	压缩模量	凝聚力	内摩擦角	承载力建议值	f _k (kPa)	
			ω	ρ _d	e	S _r	I _p	I _L	K	a _{v1+2}	E _s	C	φ			
			(%)	(g/cm ³)	(%)	(%)			(1×10 ⁻⁵ cm/s)	(MPa ⁻¹)	(MPa)	(kPa)	(°)			
al + pIQ ₃ ²	①	黄土状壤土	19.2	1.60	0.700	73.8	9.9	0.208	25	0.21	8.65	17.0	18.0	170	1:1.5	
	②	黄土状砂壤土	16.5	1.56	0.736	56.6	7.8	-0.04	34	0.19	10.2	15.0	20.0	160	1:1.75	
al + pIQ ₃ ¹	③	中砂											28.0	230	1:2.0	
	④	壤土	21.2	1.69	0.623	92.0	11.8	0.29	0.172	0.24	6.89	17.0	18.0	180	1:1.75	
	⑤	细砂											26.0	200	1:2.0	
	⑥	中砂											28.0	230	1:2.0	
	⑦	壤土	24.2	1.56	0.748	87.1	10.2	0.58	23	0.22	8.6	17.5	18.0	220	1:1.75	
	⑧	砂壤土	20.9	1.58	0.710	79.7	8.0	0.42	3.6	0.16	12.49	15.0	20.0	200	1:1.75	
	⑨	细砂											26.0	250	1:2.0	
	⑩	砾石											30.0	400	1:2.0	

3 暗涵下穿高速公路设计方案优选

南水北调中线京石段应急供水工程（河北段）中，暗渠类建筑物共 2 座，即古运河暗渠和石津渠暗渠。古运河暗渠洞身段长 435m，需依次下穿省道 S101（一级公路）、古运河和石太高速公路；石津渠暗渠洞身段长 150m，需依次下穿引岗黄输水管线、石阎公路（一级公路）和石津总干渠。

根据以往工程设计经验，对暗渠、倒虹吸类建筑物通常采用明挖方法施工。如石津渠暗渠，通过新挖导流明渠，满足石津灌渠春灌、夏灌和秋灌的要求，同时利用右岸场地修建公路临时绕行道路。该施工导流、公路导改相结合的方案工程投资较为经济，工期短，施工风险小。

对古运河暗渠而言，因穿越的石太高速公路是晋煤外运的重要通道，如采用传统的基槽明挖方案，就意味着必须修建临时绕行高速公路，平面布置须满足转弯半径和石家庄市石清公路出入口功能等要求。线路设计、赔偿等须与河北石青高速公路有限公司（香港合资企业）进行充分协商；如采用地铁工程中常用的浅埋暗挖、盾构或箱涵顶进等施工方法，技术问题又特别复杂。

鉴于石太高速为省际交通大动脉，暗渠所穿土层又是厚度不足 8m 稳定性较差的细砂层，为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，保证洞周土层结构的稳定和安全，合理选择暗渠穿石太高速设计方案，即成为该工程设计中最突出的技术难点。古运河枢纽总体布置见图 3.1。

从工程地质条件，石太高速路面高程为 88.0m，附近原地面高程为 84.2m。原地面以上为人工填筑的公路路基，以下 8.0m 范围内为天然黄土状壤土，8.0m~15.0m 为细砂层局部夹薄层壤土，15.0m 以下为深厚层砾石层。拱涵两侧主要为黄土状壤土和细砂层。

根据国内地铁施工经验，对于 10m 以下的浅埋土洞常采用基槽明挖、基坑支护明挖、浅埋暗挖、箱涵顶进、盾构机掘进等施工方法。

(1) 基坑支护明挖

基坑支护明挖是一种竖井式开挖，该方法适用于施工场地受限制的情况。它与基槽明挖的区别主要是开口面积较小，土方开挖量也较少。但为了保证周围土体的稳定，基坑四周需要用地下连续墙进行一次支护，致使相应的临时费用较高。本工程在高速公路断道情况下施工场地开阔，不存在基坑支护明挖的适用条件，因此该方案可不考虑。

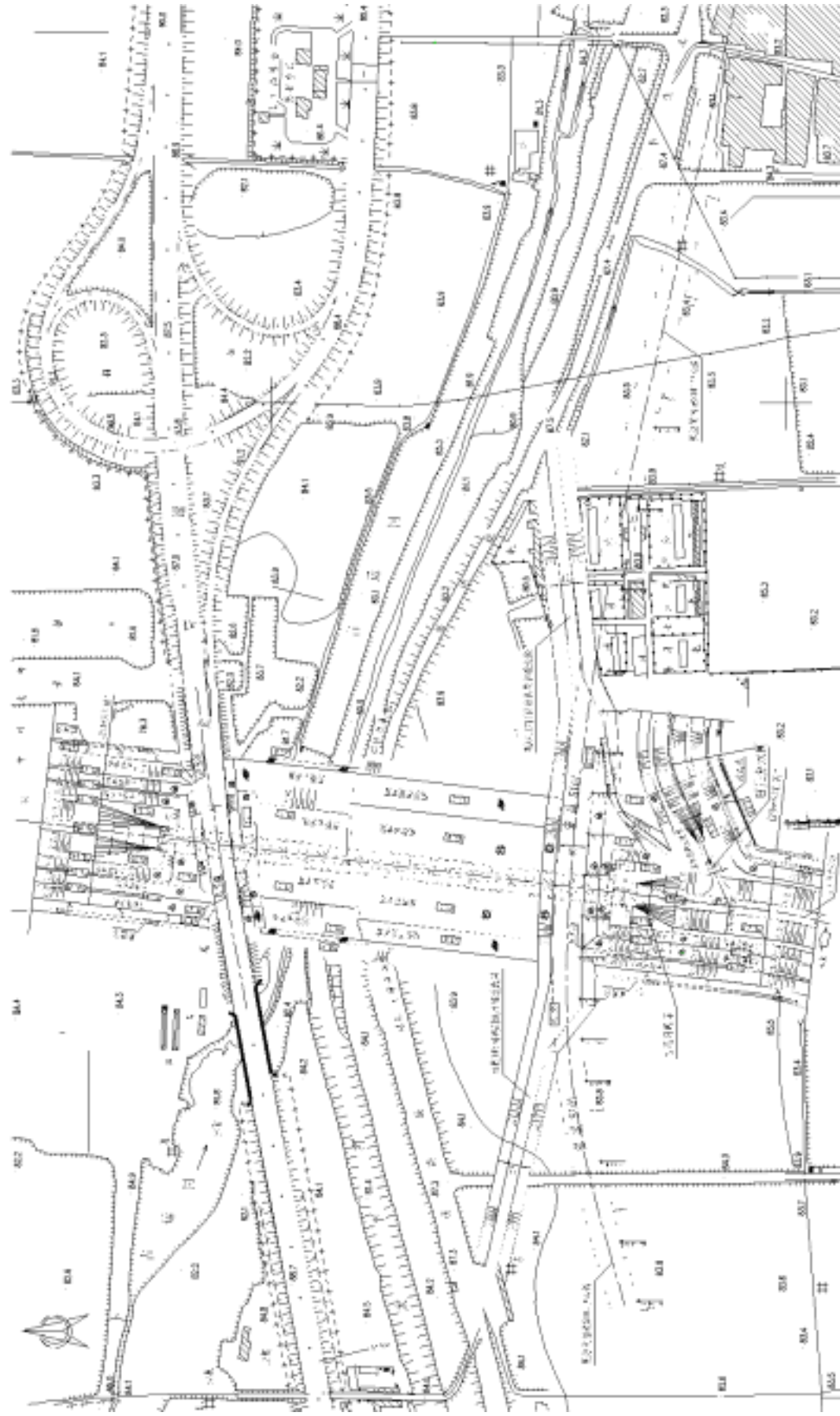


图 3.1 古运河枢纽总体布置图

(2) 箱涵顶进

箱涵顶进施工适用于覆土厚度不大的情况, 交通部门常用的覆土厚度为 2m~3m。本工程箱涵结构宽度为 25.0m, 高 10.7m, 一节箱涵重达 4296t(按每节长 15m 计算), 覆土厚度达 8.5m, 而且穿越地层为厚度较大的细砂层, 采用此法施工主要存在以下问题:

- ①目前国内尚无覆土 8m 的大型箱型结构采用顶进法施工建成的工程实例, 施工难度和风险极大;
- ②正面土体的稳定性、后背设计、千斤顶的布置很难实现;
- ③顶进施工引起的地层扰动大, 对公路路面的损伤较大, 从而会对公路的正常运营产生一定的影响;
- ④由于管节采用分段预制、分段顶进施工, 管节段接头防水处理难度大, 很难达到理想的止水效果;
- ⑤由于管节段断面尺寸较大, 需进行现场浇筑, 待到达相应强度后才能顶进, 施工工期长。

综上所述, 本工程采用顶进法施工的难度和风险大, 技术经济不合理, 因此不宜采用。

(3) 盾构机掘进

盾构机掘进是一种机械化施工方法, 开挖断面为圆形, 适用于深厚覆盖层长距离隧洞, 和开挖后能成型的较完整岩石或较密实的粘性土层。对于埋深不大的砂质土层, 目前也未发现成功的实例。该方法掘进速度较快, 但机械设备成本很高。根据工程经验, 对于长度在 1.0km 以下的短洞, 若采用盾构机施工是不经济的, 故此方案亦不予推荐。

以下仅对基槽明挖和管棚支护暗挖两方案进行技术经济比较。

3.1 暗涵明挖方案

基槽明挖方案施工工艺简单, 主体工程作业面开阔, 可充分发挥大型机械的能力, 加快施工进度; 混凝土浇筑质量易于保证, 结构整体性好。

为不影响高速公路的正常运营, 基槽开挖前, 须修建 1.08km 长临时绕行高速公路, 待该段箱涵混凝土浇筑、土方回填、高速路面恢复等工序完成后, 尚需对绕行高速公路进行拆除。

基槽明挖方案估算投资为 5584 万元, 详见表 3-1。

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

表 3-1 暗渠穿石太高速基槽明挖方案投资估算表

序号	项目名称	单位	数量	单价(元)	合价(元)	备注
一	基槽明挖方案				55833612	
1	临时绕行高速公路修建				34138211	
	土方开挖	m ³	15660	7.63	119486	
	路基土方回填	m ³	75600	17.50	1323000	
	路面 (80cm 厚)	m ²	32400	300.00	9720000	
	路面设施	m	1080	1000.00	1080000	
	跨河桥长 60m	m ²	1800	2500.00	4500000	
	征地费	亩	68	160000.00	10880000	
	复耕费	亩	68	700.00	47600	
	路缘石	m ³	810	332.50	269325	
	通讯设施费	m	1080	110.00	118800	
	买土费用	亩	38	160000.00	6080000	
2	高速公路开挖及拆除				1294696	
	土方开挖	m ³	122985	7.63	938376	
	路面设施拆除	t	136	2500.00	340000	
	路缘石拆除	m ³	136	120.00	16320	
3	暗渠主体工程				9087498	
	模筑混凝土	m ³	9913	450.52	4466005	
	钢筋制安	t	742.4	5576.50	4139994	
	止水与填缝	m	1926	250.00	481500	
4	高速公路路面恢复				3553344	
	土方回填	m ³	96560	17.50	1689800	
	0.3m 水泥稳定层	m ³	1530	74.00	113220	
	0.4m 灰土层	m ³	1530	36.00	55080	
	0.6m 厚混凝土路面	m ³	1326	331.00	438906	
	路面用钢筋	t	153	5576.50	853205	
	路面设施恢复	m	170	1000.00	170000	
	路缘石恢复	m ³	136	332.55	45227	
	通讯系统恢复	m	170	110.00	18700	
	其他费 5%				169207	
5	临时绕行高速公路拆除				5101120	
	土方开挖与外运	m ³	120200	19.60	2355920	
	桥梁拆除	m ³	2440	200.00	488000	
	路面设施拆除	t	864	2500.00	2160000	
	路缘石拆除	m ³	810	120.00	97200	
6	临建工程费		53174869	5.00%	2658743	

3.2 暗挖方案

3.2.1 方法由来

浅埋暗挖法起源于 1986 年北京地铁复兴门折返线工程,是我国最先采用的一种隧道修建技术,之后很快应用于北京、南京、深圳、广州等城市地铁的施工,近年来还应用到了市政引水工程,现在这项技术已日趋成熟。采用此法完建的工程有北京长安街 11 条地下过街人行通道、长春站 3 孔 20m 跨地下通道、天津引滦穿越大秦、京秦铁路 3 孔 20m 跨暗渠工程、南水北调中线穿越北京西五环的永定河倒虹吸工程等。

3.2.2 方法施工要点

浅埋暗挖法的突出优势在于:它适合于各种断面型式与尺寸的地下洞室;施工引起的地面沉可控制在 30mm 以内,不会影响高速公路的正常运营;将大断面花整为零,分块、分部施工,步步为环,施工安全稳妥;不需太大的施工场地,为展开工作面可两端同时施工。不足之处是,为确保施工期间洞周土体的稳定,在主体混凝土浇筑前需进行一次支护加固,具体措施包括开挖前的在顶拱做大管棚注浆和两侧小导管注浆,开挖后沿洞壁增设格栅拱架、钢筋网和锚喷支护。

不难看出,这种方法实质上是一种改进的新奥法。该方法施工工序较多而且工艺比较复杂。对于大跨径多联涵洞,因采用分部开挖还会造成二衬混凝土结构施工缝较多和施工过程中受力转换复杂的问题。

3.2.3 掌子面分区开挖方案

结合本工程跨径大、洞周砂性土质稳定性差的特点,拟采用分区开挖法。根据结构特点和各部位开挖的先后次序该方法又可分为中洞 CRD 法、中洞侧壁导坑法和边洞 CRD 法。

中洞 CRD 法系一期先完成中洞的开挖和衬砌,二期再实施两边洞。中洞开挖断面(宽×高)为 11.8m×11.6m,边洞为 6.9m×11.6m。由于中洞开挖断面太大,洞内临时支撑体系采用两横两竖格式;中洞侧壁导坑法系一期先完成当中两个以中墙中心线为对称轴 3.4m 宽的导洞开挖、支护和中墙混凝土浇筑,二期在两个中墙的支撑下相继开挖中孔顶部和底部土体,完成顶拱和底板混凝土浇筑,三期再实施两个 6.9m 宽边洞的开挖和衬砌;边洞 CRD 法系一期先完成两个 10.9m 宽边洞的开挖和衬砌,二期再实施中洞。

浅埋暗挖方案估算投资为 3126 万元,详见表 3-2。

三峡大学工程硕士专业学位论文

表 3-2 暗渠穿石太高速浅埋暗挖方案投资估算表

序号	项目名称	单位	数量	单价(元)	合价(元)	备注
二	暗挖施工方案				31261956	
1	暗挖工程费				9825792	
	洞挖土方	m ³	23700	18.09	428733	
	衬砌混凝土	m ³	9869	450.52	4446182	
	钢筋制安	t	742.4	5576.50	4139994	
	止水与填缝	m	1926	250.00	481500	
	回填灌浆	m ²	8360	39.40	329384	
2	临时支护工程费				19947499	
	一衬支护混凝土	m ³	4236	572.00	2422992	
	钢材	t	1089	6276.00	6834564	
	其他支护费用	元			4691453	
	小导管注浆费	元			2998490	
	地质条件增加费	元			3000000	
3	临建工程费		29773291	5.00%	1488665	

3.3 暗涵下穿石太高速推荐方案

通过对明、暗挖方案的比较认为，基槽明挖方案虽然优点明显，但临时工程费用较高，该方案估算投资比浅埋暗挖方案多出 2458 万元。从平面布置上看，暗渠西侧 169m 处为石太高速跨古运河桥，东侧 120m 处即为石家庄石清公路出口引道，绕行高速路的平面布置比较困难。此外，高速公路断道带来的附属工程设计和协调工作也很繁杂。

浅埋暗挖方法虽然施工工序多，施工工艺有一定难度，施工过程中结构各构件受力转换复杂，但具有技术成熟、施工灵活、风险小、能保证高速公路的正常运营、工期短、工程造价低等优点。

鉴于石太高速为省际交通大动脉，为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，暗渠下穿石太高速推荐方案采用浅埋暗挖法。

4 暗涵洞型结构方案确定

4.1 洞型结构方案分析

4.1.1 洞型结构方案的常规设计

上、下行隧道分修是公路隧道设计中最常用的方式。个别公路隧道因线路选线受地形条件等因素的限制而选用双连拱隧道，但由于运营后常出现漏水、开裂，所以不宜推广，而用超近距单孔隧道取代，技术策略应为宜近不宜连。

连拱隧道跨度大、结构复杂，在动态施工过程中，其支护体系受力状态不断发生变化和调整，围岩经多次扰动而变形，产生多次叠加，施工难度很大。目前，我国已建成的连拱隧道多在 1km 以内，大多为高速公路隧道，如已相继建成的广州白云山、四川崔家垭与石梯沟、云南练江、福建象山等一批连拱隧道，取得了一定的设计和施工经验。早期的城市地铁建设中大多采用连拱隧道结构，现在已逐渐改为大拱和 2~3 个单洞结构。

已经建成的南水北调永定河倒虹吸穿北京西五环快速路浅埋暗挖工程，西起永定河左堤堤脚，东至五环路匝道，全长 76m，与五环路夹角 82.90°。采用四孔钢筋混凝土方涵分箱布置，单孔过水断面尺寸为 3.8m×3.8m，开挖尺寸为 5.6m×5.6m。五环主路路面至结构拱顶平均高度为 11.9m。为保证北京五环路的安全，隧道开挖时采用单端进洞，每一单洞采用上、下台阶开挖，四孔箱涵采用跳格开挖方式进行。采用超前小导管注改性水玻璃浆，并结合格栅钢架、锚杆、钢筋网、喷混凝土作为初期支护，并进行二次全断面混凝土衬砌。详见图 4.1。

南水北调邢石界至古运河南渠段石太铁路涵洞初步设计推荐管棚帷幕分离式小净距三孔暗挖方案。为尽可能避免各洞室开挖时的沉降影响叠加，设计将三孔结构分成三个单洞室，洞室之间净距为 10m。从平面布置上看，需修建进、出口连接渐变段，进口将一股水分成三股水，出口再由三股水汇成一股水，水头损失较大，闸室布置比较分散。详见图 4.2、图 4.3。

4.1.2 暗涵断面型式分析

暗渠断面型式多以箱涵、拱涵和圆涵为主。从工程布置和施工角度分析，圆形断面湿周小，过水能力大，水流条件和承载性能好，但圆管不利多孔组合，与上、下游渠道衔接条件差，结构布置较为复杂。由于暗渠输水量大，设计管径在 5m 以上，如采用预制生产，吊运安装很困难；如采用现场浇筑，施工难度较大，故不宜采用。

暗渠断面采用两孔一联矩形，根据水力计算结果，单孔净宽达 9.4m，断面呈扁平状，加之暗渠埋深大，顶板所受荷载较大。如设计为整体式箱涵或拱涵，顶板及底板的结构尺寸极不合理。

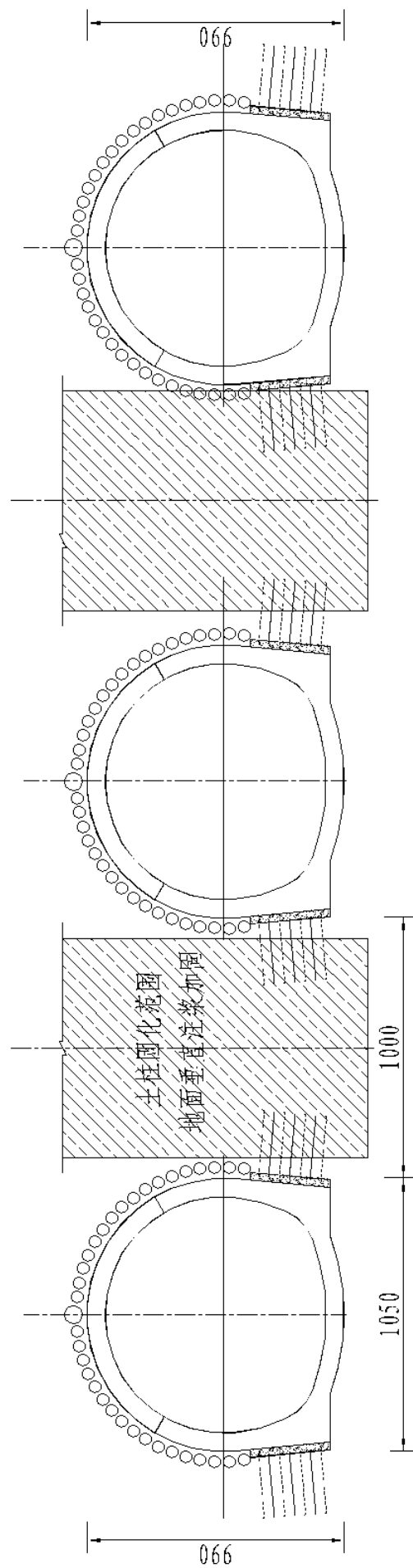


图 4.2 南水北调石太铁路涵洞管棚帷幕分离式小净距三孔暗挖方案横剖面图

三峡大学工程硕士专业学位论文

因此,洞身结构型式主要进行三孔拱涵、三孔箱涵、三孔箱涵预应力混凝土、四孔箱涵共四种方案的比较。洞身结构型式及断面尺寸比较见表 4-1。

表 4-1 洞身段结构型式及断面尺寸比较表 (单位:m)

项目	省道 S101 段				河道段		
	三孔拱涵	三孔箱涵	三孔预应力砼箱涵	四孔箱涵	三孔拱涵	三孔箱涵	四孔箱涵
过水断面	6.6×8.2	6.6×7.8	6.6×7.8	5.3×7.8	6.6×8.2	6.6×7.8	5.3×7.8
顶板厚	1.3	1.5	1.0	1.2	1.1	1.2	1.0
边墙厚	1.4	1.4	1.1	1.2	1.3	1.2	1.2
中墙厚	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
底板厚	1.7	1.6	1.2	2.1	1.4	1.4	1.8

洞身段建筑工程投资比较见表 4-2、4-3。三孔拱涵方案投资最少,其次为三孔箱涵预应力方案、三孔箱涵普通混凝土方案,四孔箱涵方案投资最大。各方案优缺点比较如下:

(1) 三孔拱涵方案

整体式三孔拱涵的顶拱受力比箱涵顶板受力好,但边墙受力条件比箱涵差,施工难度比箱涵稍大。经比较,其延米建筑工程投资不仅最少,而且拱涵断面型式更适于暗涵下穿高速暗挖段施工。

(2) 三孔箱涵方案

箱形断面形状规则,结构简单,受力明确,便于多孔组合,易于施工。由于本工程暗渠过水断面净跨大,致使顶板、底板厚度大,工程投资多。

(3) 三孔箱涵预应力混凝土方案

预应力混凝土结构设计在公路桥梁、有压圆形泄洪隧洞等工程应用较多,预应力锚索则多用于重力坝、水闸闸墩设计等。随着预应力技术的发展,预应力成本大幅度下降,大型箱形倒虹吸预应力技术得到不断研究和深入。其延米建筑投资比三孔箱涵略少。

(4) 四孔箱涵方案

四孔箱涵方案为四孔两联型式,中间分缝。洞身结构受非对称侧向荷载,受力情况复杂,致使底板断面尺寸较大。其延米建筑工程投资最大。另外,进出口闸室的土建、金结工程量较三孔方案要大。

表 4-2 省道 S101 段洞身延米建筑工程投资比较表

项 目	单价 (元)	三孔拱涵		三孔箱涵		三孔预应力砼箱涵		四孔箱涵		备注
		数量	合计(元)	数量	合计(元)	数量	合计(元)	数量	合计(元)	
土方开挖 (m³)	9.42	1055.00	9938.10	1044.00	9834.48	1044.00	9834.48	1155.00	10880.10	
土方回填 (m³)	16.55	781.00	12925.55	769.00	12726.95	769.00	12726.95	834.00	13802.70	
拱涵顶板混凝土 C30(m³)	473.82	36.58	17332.34		0.00		0.00		0.00	
箱涵顶板混凝土 C30(m³)	473.82		0.00	37.20	17626.10		0.00	33.60	15920.35	
侧墙混凝土 C30(m³)	473.82	34.90	16536.32	41.50	19663.53		0.00	56.40	26723.45	
底板混凝土 C30(m³)	473.82	42.16	19976.25	39.68	18801.18		0.00	58.80	27860.62	
箱涵顶板混凝土 C40(m³)	527.60		0.00		0.00	24.00	12662.40		0.00	
侧墙混凝土 C40(m³)	527.60		0.00		0.00	35.10	18518.76		0.00	
底板混凝土 C40(m³)	527.60		0.00		0.00	28.80	15194.88		0.00	
素混凝土垫层 C10 (m³)	287.65	2.50	719.13	2.50	719.13	2.50	719.13	2.86	822.68	
钢筋制安 (t)	5394.32	10.44	56316.70	11.72	63221.43	4.40	23735.01	15.40	83072.53	
钢绞线 L=11.0m (t)	25488.00					1.10	28036.80			
钢绞线 L=25.0m (t)	18675.84		0.00		0.00	0.90	16808.26		0.00	
建筑工程投资 (元)			133744.38		142592.80		138236.66		179082.42	

表 4-3 河道段洞身延米建筑工程投资比较表

项 目	单价(元)	三孔拱涵		三孔箱涵		四孔箱涵		备注
		数量	合计(元)	数量	合计(元)	数量	合计(元)	
土方开挖 (m³)	9.42	670.00	6311.40	657.00	6188.94	750.00	7065.00	
土方回填 (m³)	16.55	409.00	6768.95	398.00	6586.90	443.00	7331.65	
拱涵顶板混凝土 C30(m³)	473.82	31.66	15001.14		0.00		0.00	
箱涵顶板混凝土 C30(m³)	473.82		0.00	29.28	13873.45	28.00	13266.96	
侧墙混凝土 C30(m³)	473.82	34.08	16147.79	38.30	18147.31	56.40	26723.45	
底板混凝土 C30(m³)	473.82	34.72	16451.03	34.16	16185.69	50.40	23880.53	
素混凝土垫层 C10 (m³)	287.65	2.50	719.13	2.46	707.62	2.86	822.68	
钢筋制安 (t)	5394.32	9.22	49735.63	9.85	53134.05	14.00	75520.48	
建筑工程投资 (元)			111135.06		114823.96		154610.75	

4.1.3 顶拱矢高对拱涵内力的影响分析

为研究不同矢跨比对拱涵内力的影响，采用《水利水电工程微机程序集》中“ G-13 多孔涵洞内力的有限元法分析及配筋计算程序 ”，对矢跨比为 1.0/6.6、1.5/6.6、1.9/6.6 三种拱涵断面进行了内力计算、分析。

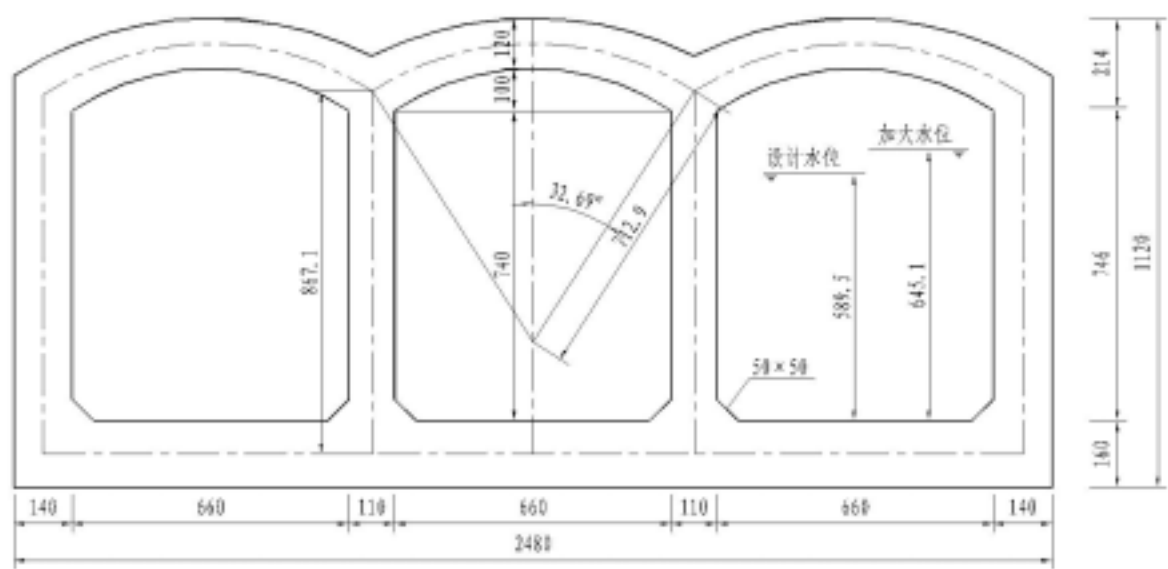


图 4.4 $f/L=1.0/6.6$

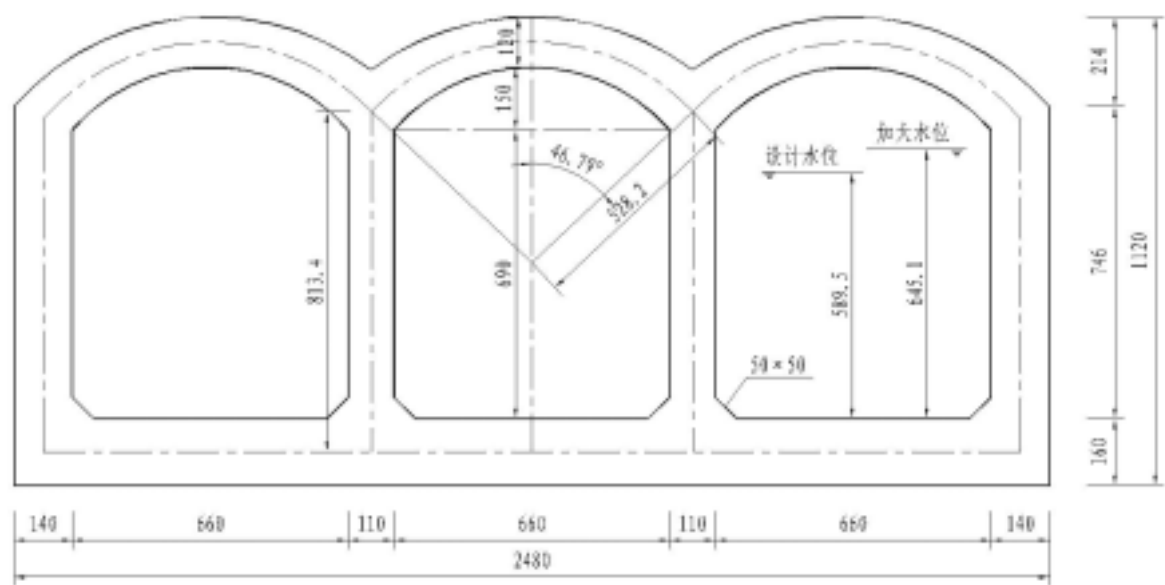


图 4.5 $f/L=1.5/6.6$

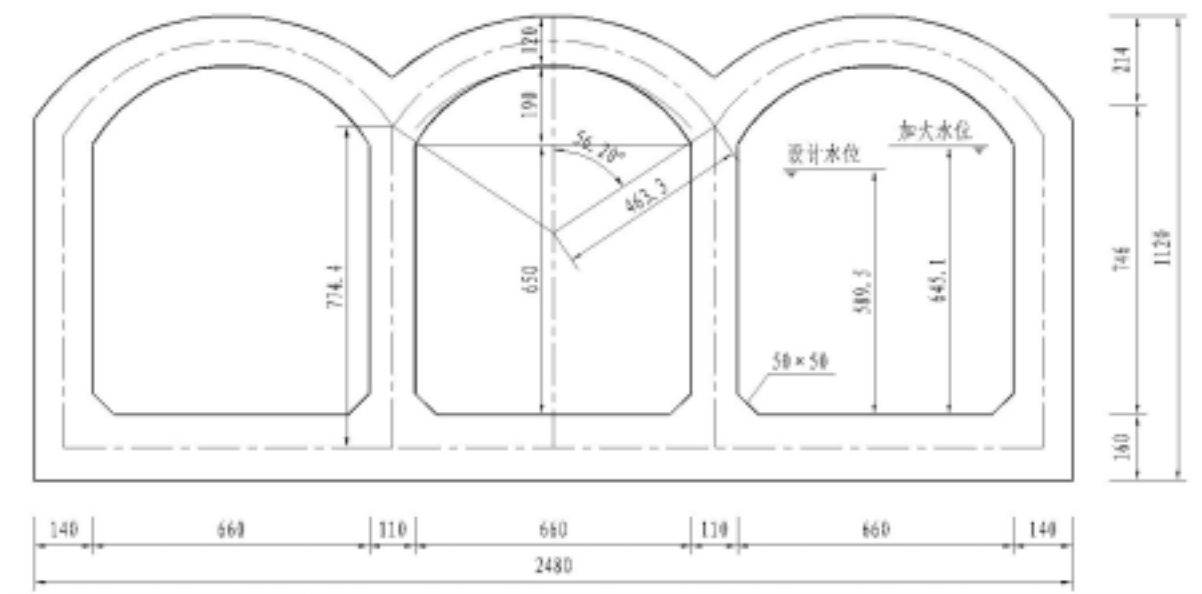


图 4.6 $f/L=1.9/6.6$

省道 S101 段拱涵不同矢跨比方案内力计算成果见表 4-4。矢跨比对拱涵内力的影响如下：

边洞顶拱：随矢跨比的增加，端部和跨中弯矩减小，轴力增加，对结构有利；

中洞顶拱：随矢跨比的增加，端部弯矩减小，跨中弯矩增加（不控制断面尺寸），轴力增加，对结构有利；

边墙：随矢跨比的增加，端部弯矩减小，跨中弯矩增加（与端部弯矩同号，不控制断面尺寸），轴力增加，对结构有利；

边洞底板：随矢跨比的增加，端部弯矩减小，跨中弯矩增加，轴力减小，对结构不利；

中洞底板：随矢跨比的增加，端部弯矩减小，跨中弯矩增加（不控制断面尺寸），轴力减小，对结构不利。

简言之，拱涵随矢跨比的增加，顶拱的受力条件较好，而对底板受力条件变差。

综合分析，采用 $f/L=1.5/6.6$ 的三孔拱涵方案。

三峡大学工程硕士学位论文

表 4-4 省道 S101 段拱涵不同矢跨比方案内力计算成果表(M/N) (单位：M-t.m, N-t)

工况	矢跨比 f/L	顶拱(1)			顶拱(2)			边墙			底板(1)			底板(2)		备注
		左节点	跨中	右节点	左节点	跨中	右节点	上节点	跨中	下节点	左节点	跨中	右节点	左节点	跨中	
1	1.0/6.6	-50.74 /65.18	75.83 /26.48	-161.34 /80.69	-141.58 /69.73	42.25 /22.10		50.74 /90.67	18.79 /102.81	98.40 /121.02	98.39 /29.64	-122.21 /29.64	132.49 /29.64	145.71 /33.44	-86.52 /33.44	
	1.5/6.6	-46.94 /79.06	72.67 /27.81	-150.78 /98.72	-131.23 /86.10	45.46 /22.67		46.94 /92.52	22.26 /103.90	97.18 /120.99	97.18 /28.79	-123.30 /28.79	131.12 /28.79	144.77 /32.87	-87.00 /32.87	
	1.9/6.6	-44.87 /86.85	70.51 /28.98	-142.53 /107.93	-123.63 /95.05	48.45 /23.22		44.87 /94.21	24.69 /102.35	96.08 /121.32	96.08 /28.11	-124.96 /28.11	129.50 /28.11	143.16 /32.32	-88.40 /32.32	
4	1.0/6.6	-73.93 /106.43	39.25 /75.19	-104.53 /110.72	-94.53 /106.43	36.84 /72.63		73.93 /101.43	-52.32 /116.60	172.73 /131.77	172.75 /100.68	-89.81 /100.68	125.55 /100.68	137.70 /103.23	-94.83 /103.23	
	1.5/6.6	-51.61 /112.94	30.98 /76.53	-79.36 /118.20	-69.63 /113.70	31.38 /73.81		51.61 /102.76	-49.17 /114.15	170.54 /131.23	170.55 /99.33	-90.36 /99.33	125.95 /99.33	138.40 /102.06	-93.98 /102.06	
	1.9/6.6	-36.21 /114.74	26.06 /77.43	-619.15 /1202.91	-526.85 /1159.64	281.76 /746.33		362.13 /1039.26	-471.87 /1147.67	1688.08 /1310.30	1688.12 /984.36	-911.39 /984.36	1263.87 /984.36	138.78 /101.23	-93.78 /101.23	

注：顶板、底板的弯矩值以上侧受拉为负，下侧受拉为正；
侧墙的弯矩值以内侧受拉为负，外侧受拉为正；轴力以受压为正。

4.1.4 顶拱轴线的确定

拱轴线一般可设计成圆拱、抛物线拱、悬链线拱等几种型式。对三孔一联拱涵而言,如选用抛物线拱或悬链线拱,一是没有三孔一联拱涵的计算程序,二是模板制作非常困难。因此,拱涵的拱轴线选用圆拱型式。

经过等截面圆拱和变截面圆拱的内力计算分析,二者对结构各部位内力的影响不大,从截面配筋、抗限裂角度分析,采用变截面圆拱型式,即将拱脚部位结构尺寸适当加厚。

4.2 洞型结构方案确定

从平面布置上看,古运河暗渠洞身段总长为 435m,其中 1#~18#管节为基槽明挖段,长度为 355m;19#~26#管节为穿高速暗挖段,长度为 80m;下游紧接着布置有出口闸室和出口渐变段。

如采用永定河倒虹吸穿北京五环路四孔分箱布置型式,洞身断面应为拱涵型式。存在如下问题:

(1) 中墙厚度将由明挖段的 1.2m 渐变至暗挖段的 3.2m,再渐变回闸室的 1.2m,水流在平面上出现两次转向,需新增水头损失,而在规划给定水头的情况下,则要通过增加洞身过水断面来弥补,势必引起土建、金结等工程量的增加;

(2) 单个洞室跨度达 13m,即使采用中洞 CRD 两横两竖结构,亦难以满足路面沉降要求。同时要求一衬混凝土具有足够强度,保证二衬混凝土浇筑期间的洞室安全。

如采用石太铁路涵洞分离式小净距布置型式,洞身断面应为马蹄形。在暗挖段之前,洞身断面型式将由三孔一联整体式拱涵渐变为三孔分离式马蹄形涵洞;而在出口闸室前尚需渐变回三孔一联整体式拱涵型式。出口闸室分散布置,出口渐变段需将三股水汇成一股水,而且水流在平面上出现多次转向,这些都要占用较多的水头损失。

综上所述,虽然暗挖洞室的施工过程中的受力转换、施工工艺复杂,但是暗挖段不额外占用水头损失,工程投资最为经济,因此,推荐三孔一联整体拱涵布置方案。

5 暗涵结构计算分析

5.1 不同地基对结构内力的影响

5.1.1 问题的提出

倒虹吸、涵洞工程结构设计中,对箱形管的横向结构计算,可将横断面看成一闭合框架结构,一般多按结构力学方法分析,有现成图表公式可供引用;也可用弯矩分配法、迭代法或相应计算机软件计算内力。地基反力可按直线分布考虑。

对中、小型倒虹吸、涵洞工程而言,因孔径较小(一般 3m~5m),覆土厚度不大,地基反力按直线分布假定的计算误差较小,基本满足工程设计精度的要求。

对大孔径暗涵工程而言,过水断面、管壁厚度、覆土厚度均较大,为搞清不同地基模型对结构内力的影响,结合石津渠暗渠三孔一联箱涵结构设计,采用地基反力直线分布假定、文克尔地基假定、半无限弹性地基假定三种地基模型进行了内力计算、分析。

5.1.2 地基模型的分类

5.1.2.1 反力直线分布的假设

假设地基反力沿梁长按直线分布,实质上是把地基看成是文克尔地基(弹簧地基)的同时,把梁看成是不变形的绝对刚性体。适用于刚度很大而水平尺寸较小的结构或构件,特别是当这些结构搁置于薄压缩层地基上的时候。该算法非常简便,但算出的反力与实际的反力分布有较大差异。

传统的内力计算方法如查表法、力矩分配法、转角位移法均属此假设。

5.1.2.2 弹性地基梁的两种理论

(1) 基础梁的基本微分方程式

弹性地基上的基础梁,在已经外荷载 $q_{(x)}$ 及待求的地基反力 $p_{(x)}$ 作用下产生挠曲变形,其挠曲微分方程式为:

$$E_c I_c \frac{d^4 z}{dx^4} = q_{(x)} - p_{(x)}$$

式中: E_c ——基础梁的弹性模量,吨力/米²(1 吨力/米² $\approx$ 10 千帕);

I_c ——基础梁断面的惯性矩,米⁴;

z ——梁的挠度(即垂直下沉量),米;

x ——梁的横向坐标,米。

假设地基和基础是连续的,即基础底面与地基表面各点都是互相接触的,二者之间没有缝隙,即

$$Z_{(x)}=S_{(x)}$$

式中, $S_{(x)}$ 为地基表面的沉降。

因地基表面的变形与荷载有一定的关系, 取为

$$p_{(x)}=f_{(z)}$$

代入上式中可得

$$E_c I_c \frac{d^4 z}{dx^4} = q_{ixj} - f_{(x)}$$

这就是弹性地基梁的基本微分方程式。对于 $p_{(x)}=f_{(z)}$ 采取不同的假设得到了两类求解弹性地基梁的理论。

(2) 文克尔理论

1867 年捷克工程师文克尔(E.Winkler)提出如下的假设:

$$P=kz=kS$$

即地基沉降与地基单位面积上所受的壓力成正比。

k 为取决于地基变形性质的比例系数, 称为地基反力系数, 也称为基床系数或垫层系数, 是地基产生单位沉降的壓力强度。其因次为吨力/米³(1 吨力/米³≈10 千牛/米³)或公斤力/厘米³(1 公斤力/厘米³≈10 兆牛/米³)。

$$E_c I_c \frac{d^4 z}{dx^4} = q_{ixj} - kZ_{(x)}$$

这就是文克尔理论的基本微分方程式。解之可得 $Z_{(x)}$ 与 $p_{(x)}$ 的分布。

文克尔假设地基某点沉降量 $S_{(x)}$ 只与该点上的壓力强度 $P_{(x)}$ 有关, 而与相邻的荷载没有关系, 其实质是将地基看成是刚性底座上的许多互不联系的竖起弹簧。适用于薄压缩层(一般指压缩层厚度小于 0.25~0.4 倍的基础宽度)和软弱地基。该假设考虑梁本身的实际弹性变形, 但没有反映地基的变形连续性。特别对于密实厚土层地基和整体岩石地基, 将会引起较大的误差。

《水利水电工程微机程序集》中“G-13 多孔涵洞内力的有限元法分析及配筋计算程序”即按此假设, 采用初参数(y_0 、 θ_0 、 M_0 、 Q_0)法求解。

(3) 半无限理想线性弹性体理论

半无限弹性体表面作用着各种荷载的地面沉降变形已为弹性理论解出, 当表面作用着集中荷载 P 时地面上任意点的沉降。

$$S = \frac{P(1-u^2)}{\pi E r}$$

当地面上作用着分布荷载 $p_{(x)}$ 时, 任一点的沉降可通过上式积分得到。将此种地

面变形和荷载的关系式代入上式中即可得到半无限弹性体上梁(或板)的基本微分方程式。解之也可得到基础梁的挠度 $z_{(x)}$ 和地基反力 $p_{(x)}$ 的分布。

其实质是把地基看成是一个均质、连续、弹性的半无限体,适用于均质的厚层地基和边载影响较大的基础梁设计。该假设没有考虑土壤的非弹性性、不均匀性和分层特点。链杆法的求解思路是:把连续支承于地基上的梁简化为用有限个链杆支承于地基上的梁。或者说,把连续分布的支承反力简化为阶梯形分布的反力。其数学处理比较复杂,链杆个数越多,近似解的精确度越高,相应计算工作量也越大。本例中使用的“HN(1)箱涵结构计算程序”即为该假设。

5.1.3 不同地基对结构内力的影响分析

根据地基反力分布的不同假定,采用以下 3 种计算方法:

①地基反力直线分布假定,采用山东临沂地区水利局王江海等编制的“箱涵结构计算程序”(HN1)。

②文克尔地基假定,采用《水利水电工程微机通用程序集》(1.0)中“多孔涵洞内力的有限元法分析及配筋计算程序”(G-13-2)。

③半无限弹性地基假定,采用山东临沂地区水利局王江海等编制的“箱涵结构计算程序”(HN1)。

不同地基对结构内力的影响分析表明:

(1) 地基反力按直线分布的假设与文克尔假设的计算结果非常接近,且对结构是偏于安全的,建议优先使用。对检修工况可考虑采用 HN(1)程序或 Sap84 程序进行验算。

(2) 实际的工程地基常不是上述的典型情况,应通过合理选用变形参数使理论计算结果与实际逼近。

5.2 三孔一联整体受力结构计算

古运河暗挖段管身断面见图 5.1，壁厚按满足正截面、斜截面承载能力及正常使用极限状态要求的最薄断面的原则，通过试算确定。计算工况及极限状态见表 5-1。

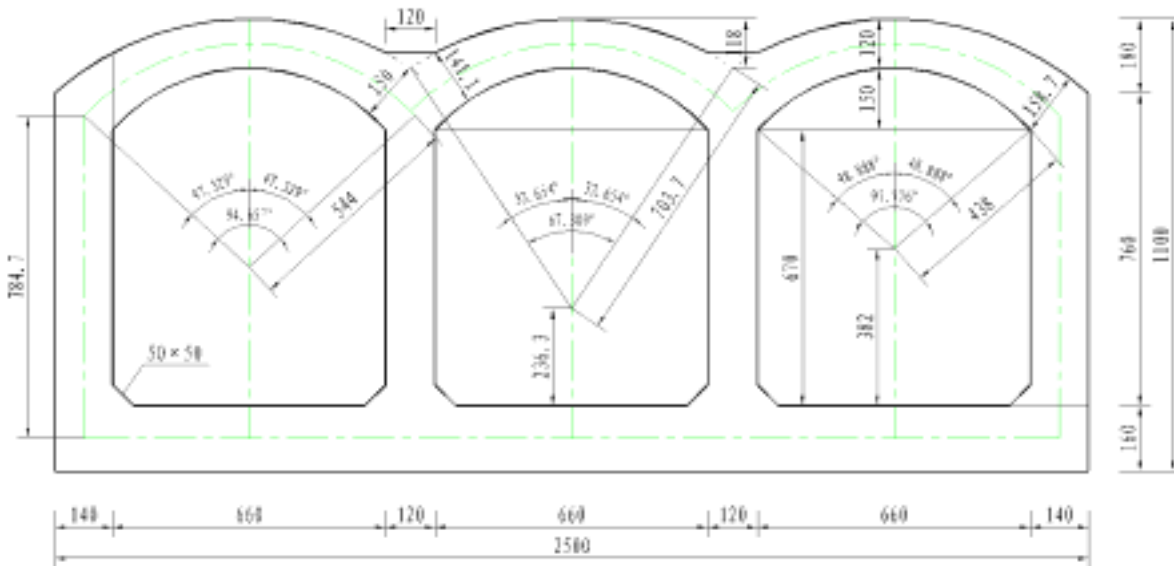


图 5.1 古运河暗挖段管身结构图（单位：cm）

表 5-1 古运河暗渠拱涵计算工况及极限状态

荷载组合	计算工况	荷载种类						正常使用 极限状态 验算	备注	
		自重	内水压	外水压	土压力	扬压力	车辆荷载			地震力
基本组合	1.渠道设计流量，河道无水	√	√		√		√		抗裂	
	2.渠道设计流量，河道设计洪水	√	√	√	√	√	√		抗裂	
	3.渠道无水，河道无水	√			√		√		0.25mm	
	4.渠道无水，河道设计洪水	√		√	√	√	√		0.25mm	
特殊组合	5.渠道加大流量，河道无水	√	√		√		√		×	
	6.中孔检修，两边孔过水，河道无水	√	√		√		√			
	7.两边孔检修，中孔过水，河道无水	√	√		√		√			
	8.渠道无水，河道校核洪水	√		√	√	√	√		×	

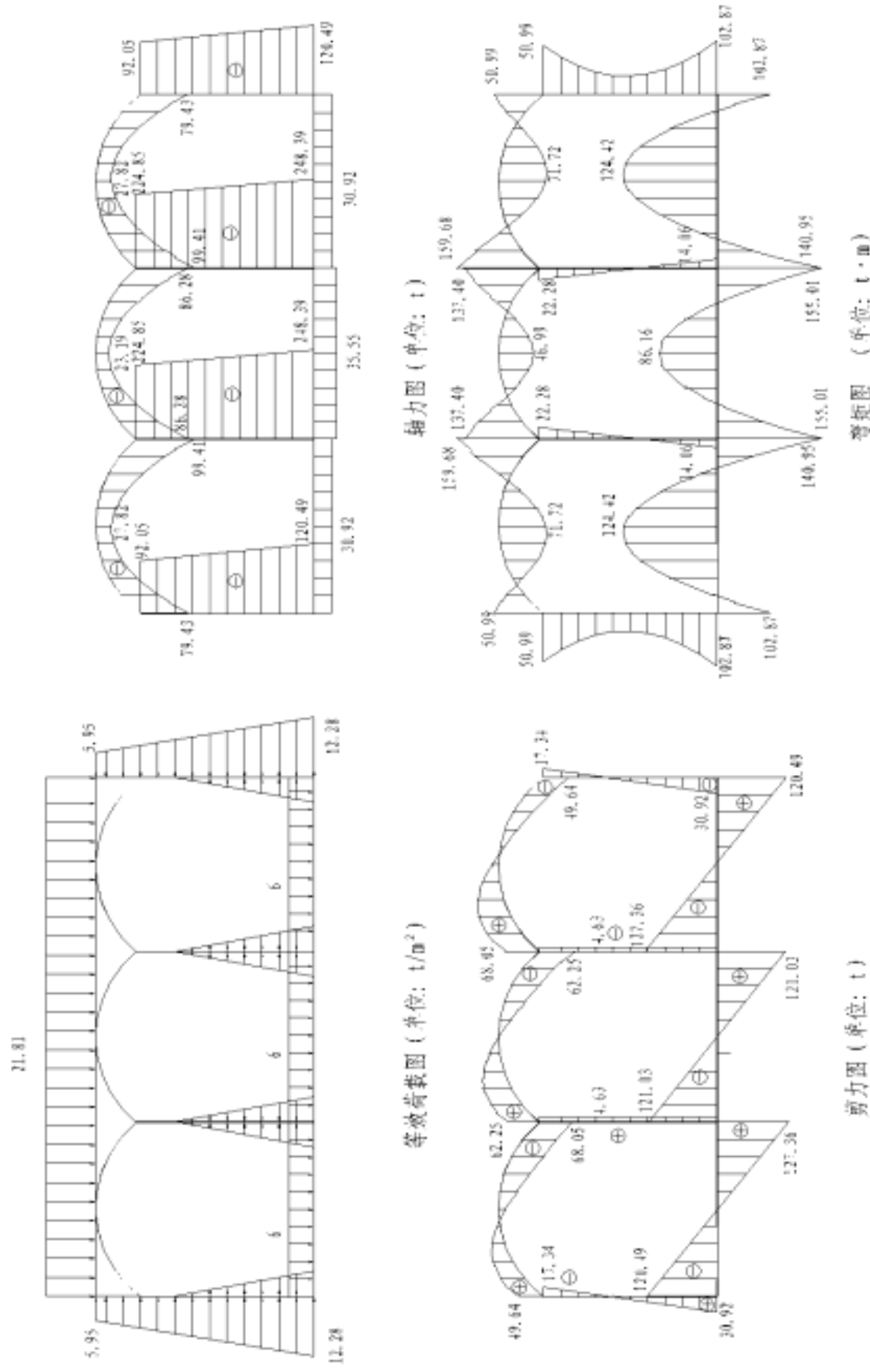
采用《水利水电工程微机程序集》中“G-13 多孔涵洞内力的有限元法分析及配筋计算程序”及 SAP84 程序进行内力计算，计算成果见表 5-2，荷载及内力标准值简图见图 5.2～图 5.7。

三峡大学工程硕士专业学位论文

表 5-2 高速公路段拱涵正常使用极限状态内力计算成果表(M/N) (单位：M-t.m, N-t)

工况	计算方法	边顶拱			中顶拱			侧墙			边底板			中底板		备注
		左节点	跨中	右节点	左节点	跨中	右节点	跨中	底节点	左节点	跨中	右节点	左节点	跨中	右节点	
1	G-13-1 程序	-50.99 /79.43	71.71 /27.83	-159.68 /99.41	-137.40 /86.28	46.99 /23.19			102.87 /120.49	102.87 /30.92	-124.42 /30.92	140.95 /30.92	155.01 /35.55	-86.16 /35.55		
	SAP84 程序	-55.34 /99.08	85.63 /33.69	-140.13 /115.07	-114.90 /98.67	35.69 /30.14			106.21 /147.50	106.21 /34.23	-135.05 /34.23	145.33 /34.23	159.98 /39.31	-89.81 /39.31		
2	G-13-1 程序	-50.19 /107.29	43.05 /69.55	-106.29 /117.60	-91.51 /109.94	36.26 /65.85	-27.04 /114.19		156.78 /131.02	156.78 /81.80	-105.73 /81.80	141.06 /81.80	155.26 /85.49	-93.56 /85.49		
	SAP84 程序	-49.61 /134.49	74.44 /72.41	-126.39 /150.48	-85.73 /125.99	14.55 /63.58	-24.21 /155.01		190.43 /172.18	190.43 /89.51	-134.70 /89.51	127.04 /89.51	160.78 /98.99	-114.16 /98.99		
3	G-13-1 程序	-52.16 /86.98	62.50 /37.46	-142.71 /103.62	-123.17 /92.41	44.23 /33.20			120.01 /122.76	120.00 /50.08	-116.77 /50.08	139.40 /50.08	153.30 /54.34	-87.81 /54.34		
	SAP84 程序	-56.13 /103.27	79.73 /38.65	-134.11 /118.12	-108.81 /102.05	33.45 /34.83			121.93 /148.75	121.92 /50.67	-130.94 /50.67	142.05 /50.67	158.32 /55.96	-92.66 /55.96		
4	G-13-1 程序	-50.40 /121.51	26.41 /90.22	-73.48 /125.75	-63.57 /121.56	30.14 /87.17	-59.21 /118.32		187.82 /135.15	187.81 /114.45	-91.94 /114.45	138.11 /114.45	152.18 /117.50	-96.54 /117.50		
	SAP84 程序	-49.36 /149.91	62.61 /89.68	-110.21 /163.61	-66.47 /137.94	5.22 /80.01	-49.59 /163.88		228.58 /180.36	228.58 /121.78	-128.38 /121.78	117.93 /121.78	157.68 /132.42	-122.46 /132.42		
5	G-13-1 程序	-50.90 /78.87	72.44 /27.10	-160.95 /99.10	-138.46 /85.82	47.19 /22.44			101.58 /120.32	101.58 /29.48	-125.00 /29.48	141.07 /29.48	155.14 /34.14	-86.03 /34.14		
	SAP84 程序	-55.18 /97.59	87.49 /31.94	-142.51 /114.00	-117.14 /97.43	36.46 /28.43			102.93 /147.02	102.93 /31.58	-136.08 /31.58	145.96 /31.58	160.36 /36.64	-89.29 /36.64		
6	SAP84 程序	-45.21 /93.69	92.78 /29.02	-154.82 /113.96	-125.12 /96.91	29.73 /27.72			114.09 /144.21	114.09 /34.27	-128.74 /34.27	120.30 /34.27	168.41 /60.12	-111.14 /60.12		
7	SAP84 程序	-66.13 /107.18	74.48 /41.58	-121.86 /118.18	-100.88 /102.58	40.25 /35.54			110.77 /151.60	110.77 /47.97	-138.32 /47.97	167.74 /47.97	150.30 /32.48	-70.82 /32.48		
8	G-13-1 程序	-50.94 /123.30	26.08 /92.08	-73.02 /127.36	-63.24 /123.27	30.16 /89.04	-60.66 /119.65		190.20 /136.48	190.19 /116.13	-92.45 /116.13	139.53 /116.13	153.64 /119.17	-97.46 /119.17		
	SAP84 程序	-49.87 /152.18	63.48 /91.26	-111.39 /166.07	-66.79 /139.87	4.84 /81.43	-50.58 /166.15		232.12 /182.63	232.12 /123.62	-129.88 /123.62	118.77 /123.62	159.33 /134.47	-124.11 /134.47		

注：顶板、底板的弯矩值以上侧受拉为正，下侧受拉为负；侧墙的弯矩值以内侧受拉为正，外侧受拉为负；轴力以受压为正。



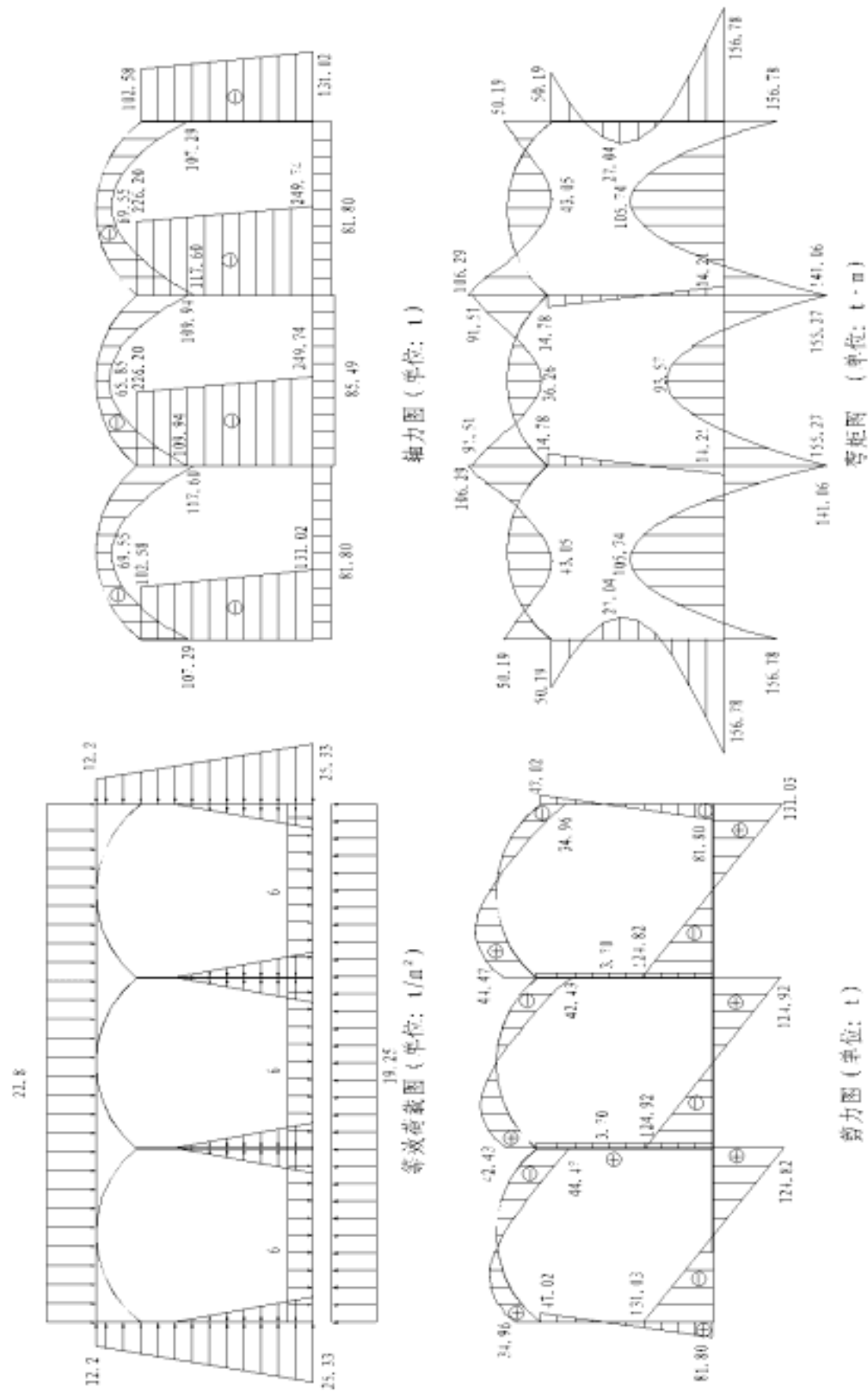


图 5.3 高速公路段拱涵荷载及内力标准值简图 (工况 2: 渠道设计流量, 河道设计洪水)

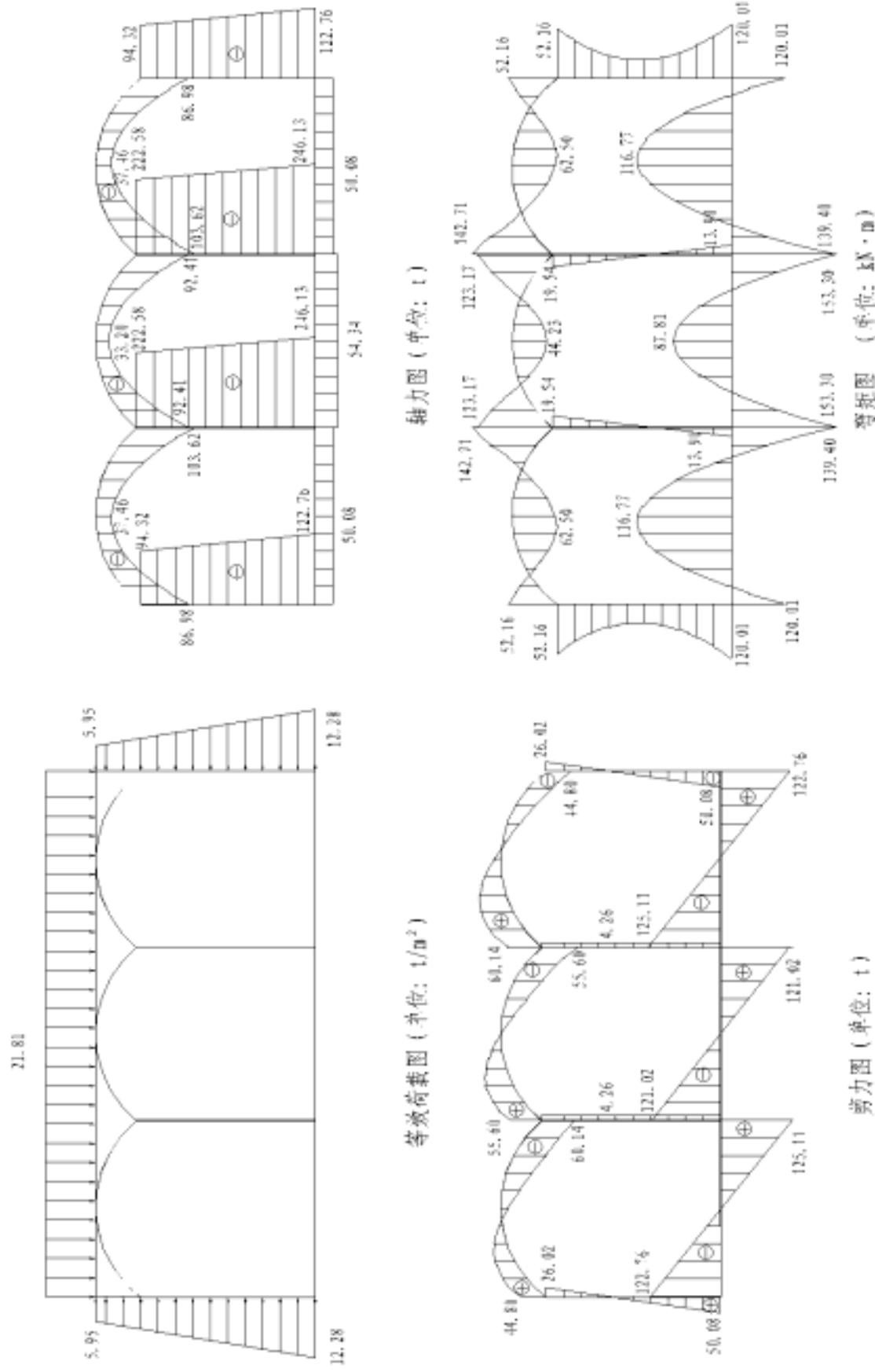


图 5.4 高速公路段拱涵荷载及内力标准值简图 (工况 3: 渠道无水, 河道无水)

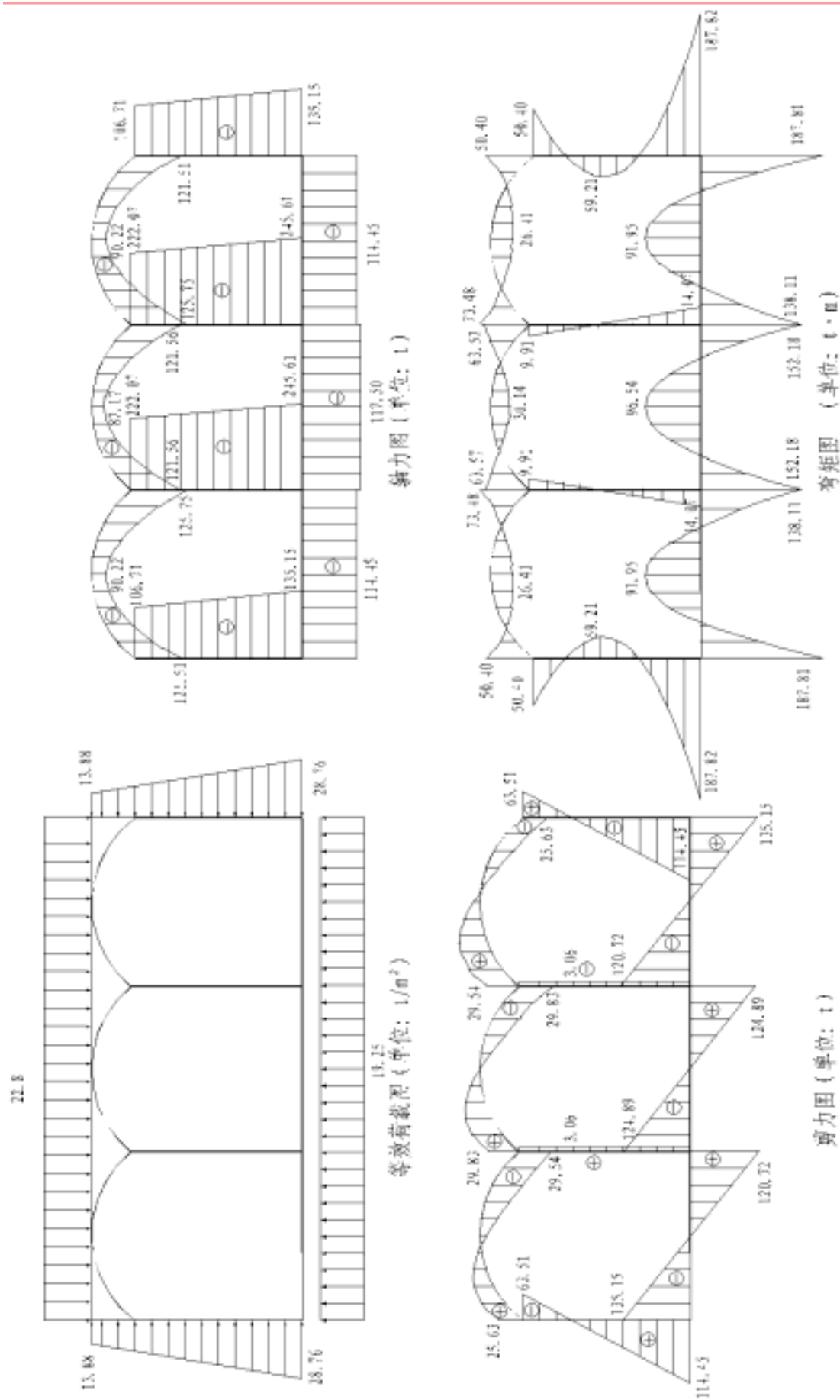


图 5.5 高速公路段拱涵荷载及内力标准值简图 (工况 4: 渠道无水, 河道设计洪水)

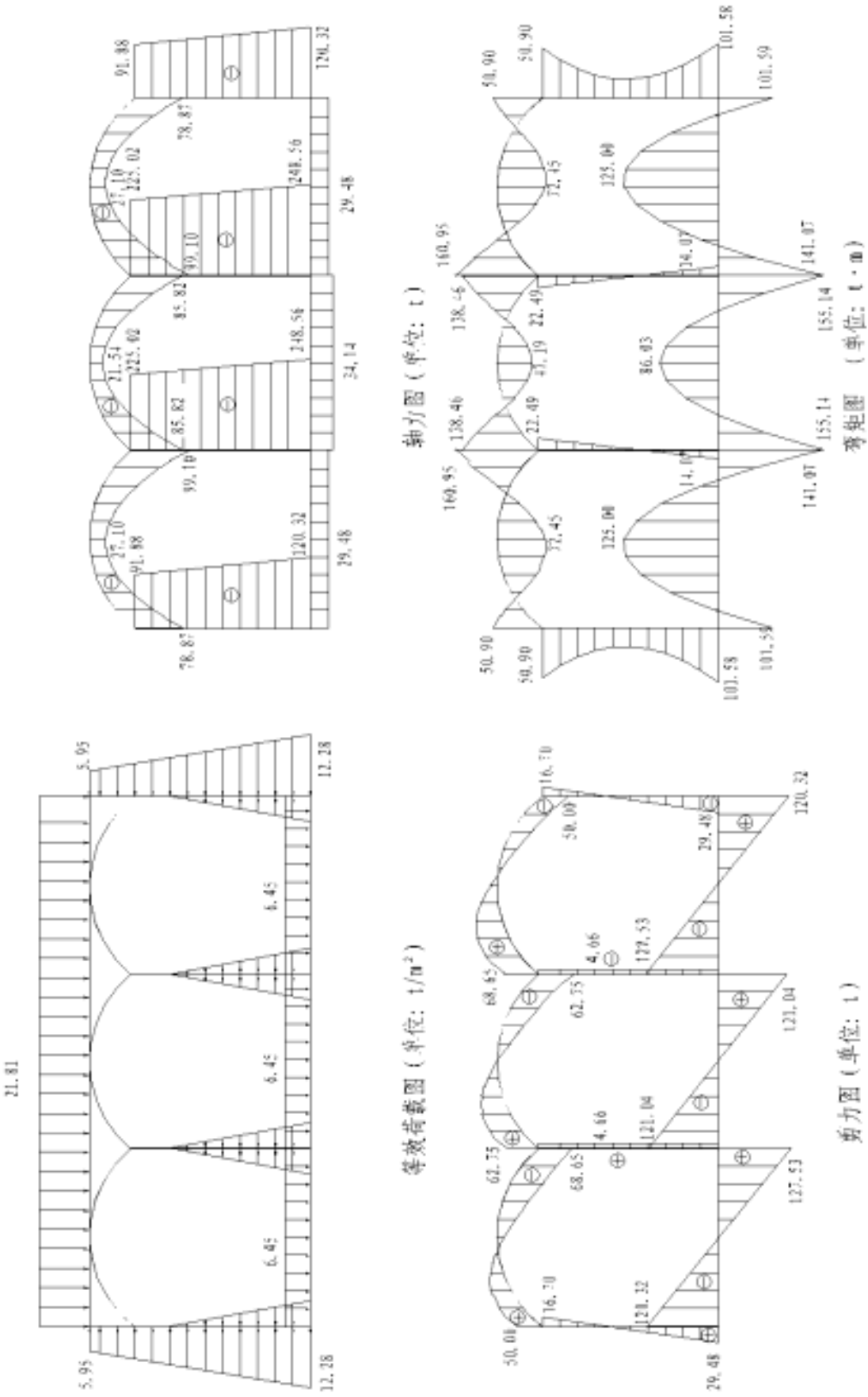
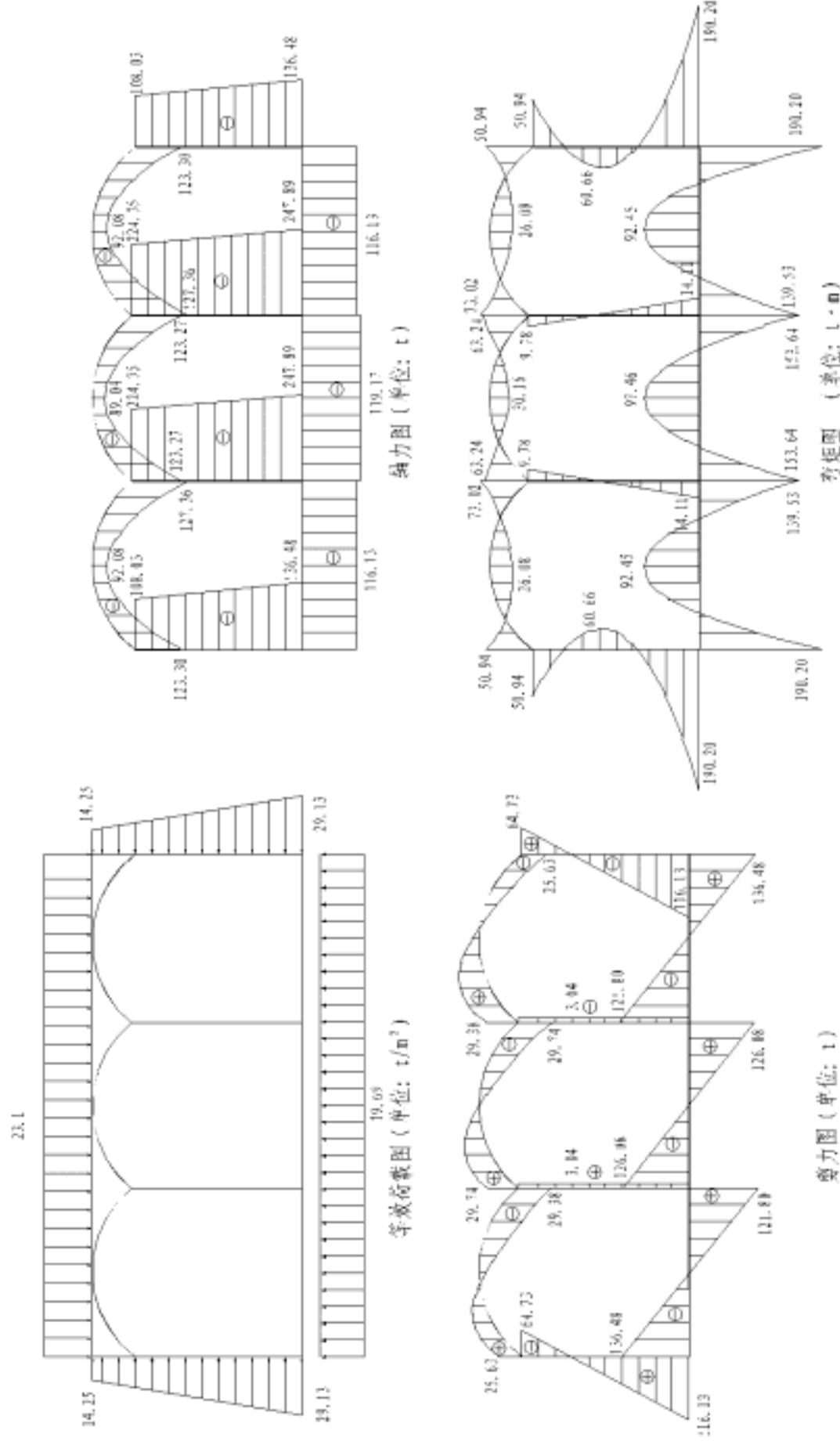


图 5.6 高速公路拱涵荷载及内力标准值简图 (工况 5: 渠道加大流量, 河道无水)



5.3 施工过程中内力计算

5.3.1 计算程序及工况

为更好地模拟一衬、二衬结构在施工过程中的受力情况,采用清华大学土木工程系袁驷教授等研制的“结构力学求解器 V1.5 (SM Solver for Windows)”进行了一衬、二衬结构的受力计算。

该程序是一个面向教师、学生以及工程技术人员的计算机辅助分析计算软件(课件),其求解内容包括了二维平面结构(体系)的几何组成、静定、超静定、位移、内力、影响线、自由振动、弹性稳定、极限荷载等经典结构力学课程中所涉及的一系列问题,全部采用精确算法给出精确解答。

计算采用结构力学模型,模型取一、二衬结构中轴线。一、二衬结构之间联合受力的话,采用刚性杆连接,如计算中发现该刚性杆为拉杆,则将此杆件取消。

计算工况如下:

- (1) 单导洞一衬受力情况;
- (2) 双导洞一衬联合受力情况;
- (3) 中洞一、二衬结构联合受力情况
 - ①中洞二衬结构形成、二衬顶拱无铰、未设拉杆情况
 - ②中洞二衬结构形成、二衬顶拱无铰、设置拉杆情况
 - ③中洞二衬结构形成、二衬顶拱设铰情况
- (4) 中洞二衬形成、边洞开挖情况

各计算工况荷载模型、内力图、位移图见图 5.8~图 5.37,位移计算成果见表 5-3~表 5-8。

5.3.2 单导洞一衬受力情况

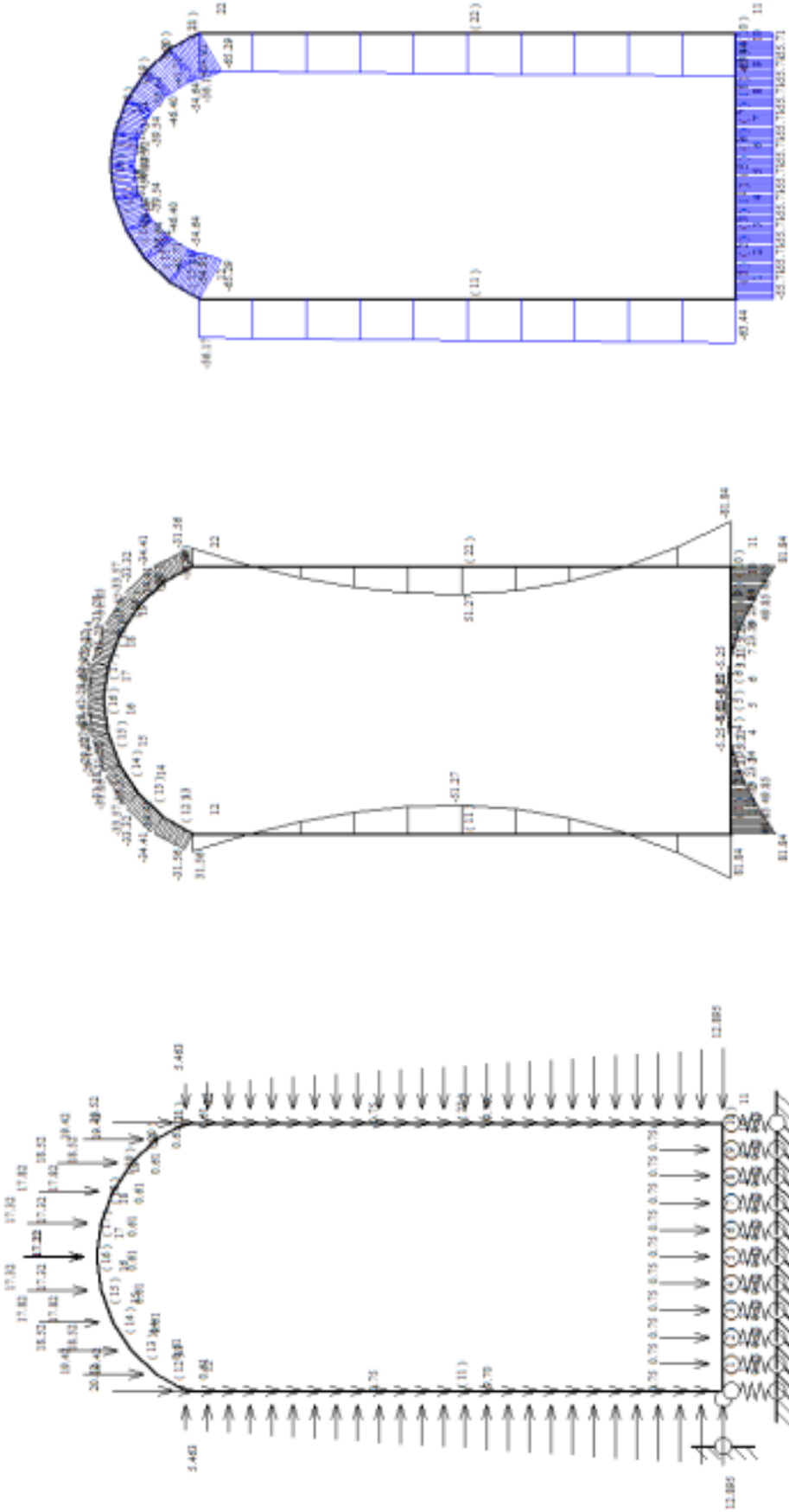


图 5.8 单导洞一衬荷载模型(单位：t/m²)

图 5.9 单导洞一衬弯矩图(单位：t.m)

图 5.10 单导洞一衬剪力图(单位：t)

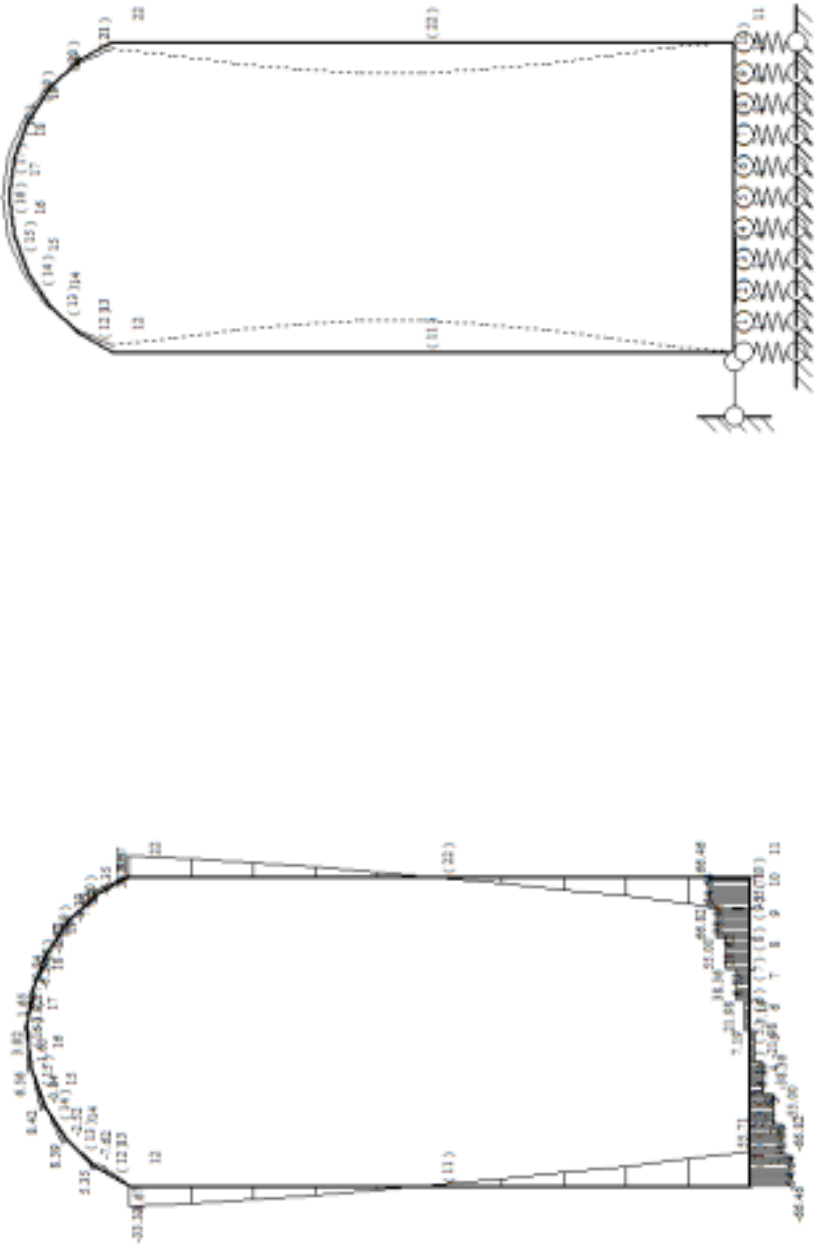


图 5.11 单导洞一衬剪力图(单位: t)

图 5.12 单导洞一衬位移图

三峡大学工程硕士学位论文

表 5-3 中导洞一衬结构位移计算成果(单位:m)

单元码	杆端 1				杆端 2			
	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角		u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	
1	0.00000000	-0.00146779	-0.01717224		-0.00004099	-0.00731926	-0.00790546	
2	-0.00000409	-0.00731926	-0.00790546		-0.00000819	-0.00966790	-0.00245667	
3	-0.00000819	-0.00966790	-0.00245667		-0.00012296	-0.01015376	0.00001655	
4	-0.00012296	-0.01015376	0.00001655		-0.00016394	-0.00997018	0.00050127	
5	-0.00016394	-0.00997018	0.00050127		-0.00020493	-0.00983029	0.00000000	
6	-0.00020493	-0.00983029	0.00000000		-0.00024591	-0.00997018	-0.00050127	
7	-0.00024591	-0.00997018	-0.00050127		-0.00028690	-0.01015376	-0.00001655	
8	-0.00028690	-0.01015376	-0.00001655		-0.00032788	-0.00966790	0.00245667	
9	-0.00032788	-0.00966790	0.00245667		-0.00036887	-0.00731926	0.00790546	
10	-0.00036887	-0.00731926	0.00790546		-0.00040985	-0.00146779	0.01717224	
11	0.02895218	-0.00236030	0.02866568		0.00000000	-0.00146779	-0.01717224	
12	0.02895218	-0.00236030	0.02866568		0.01520833	0.00526297	0.02270368	
13	0.01520833	0.00526297	0.02270368		0.00637228	0.01335863	0.01655963	
14	0.00637228	0.01335863	0.01655963		0.00172238	0.02023924	0.01069461	
15	0.00172238	0.02023924	0.01069461		0.00001326	0.02476929	0.00521943	
16	0.00001326	0.02476929	0.00521943		-0.00020493	0.02634142	0.00000000	
17	-0.00020493	0.02634142	0.00000000		-0.00042312	0.02476929	-0.00521943	
18	-0.00042312	0.02476929	-0.00521943		-0.00213223	0.02023924	-0.01069461	
19	-0.00213223	0.02023924	-0.01069461		-0.00678213	0.01335863	-0.01655963	
20	-0.00678213	0.01335863	-0.01655963		-0.01561818	0.00526297	-0.02270368	
21	-0.01561818	0.00526297	-0.02270368		-0.02936204	-0.00236030	-0.02866568	
22	-0.02936204	-0.00236030	-0.02866568		-0.00040985	-0.00146779	0.01717224	

5.3.3 双导洞—衬联合受力情况

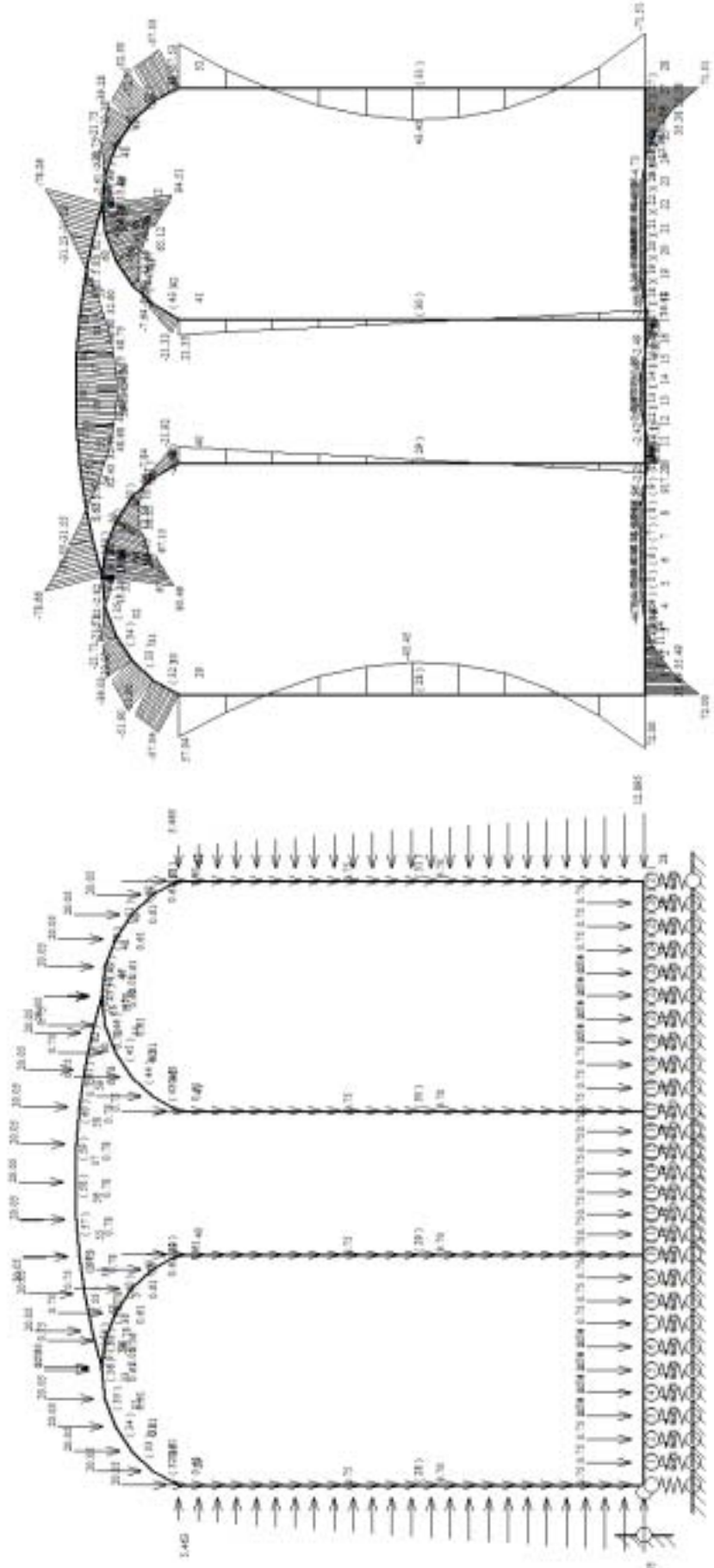


图 5.13 双导洞—衬荷载模型(单位: t/m^2)

图5.14 双导洞一衬弯矩图(单位:t.m)

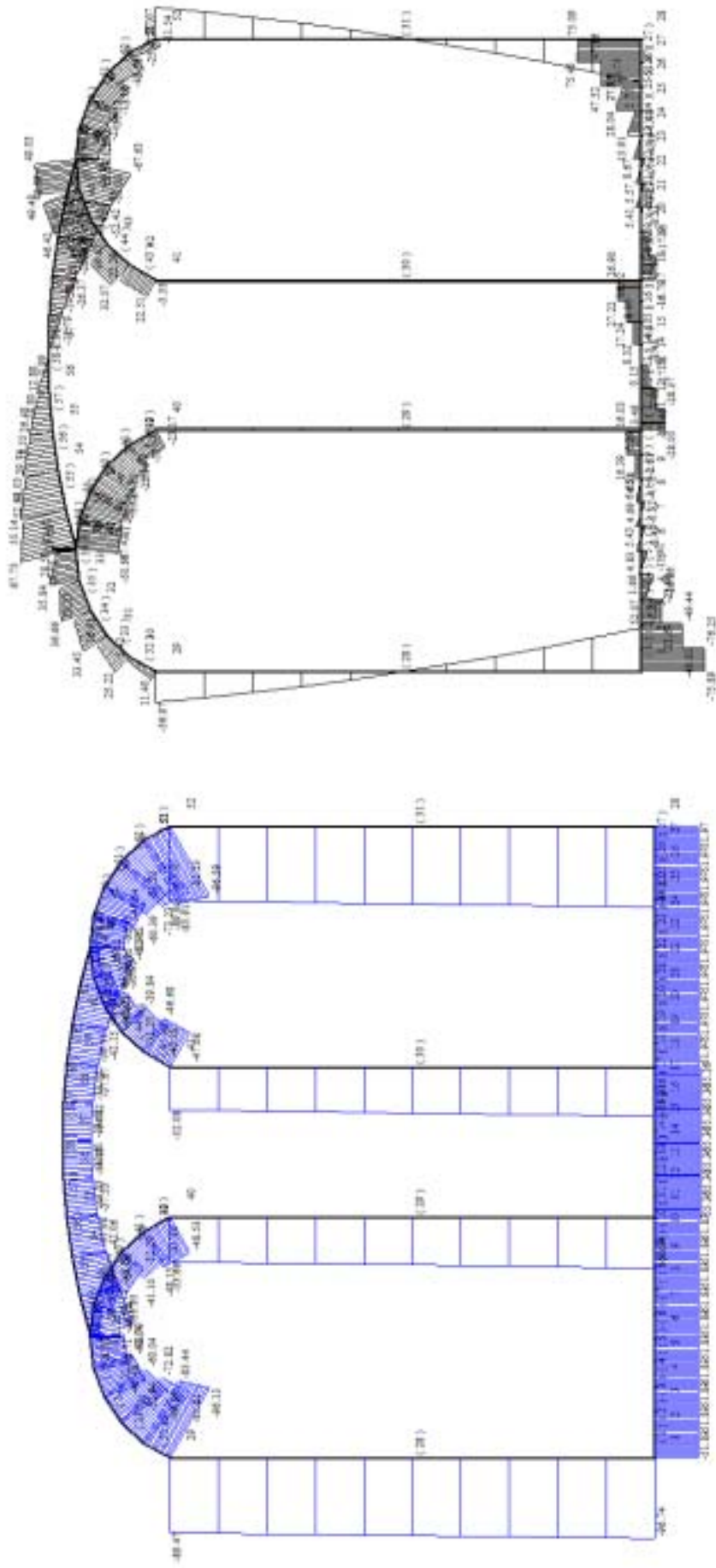


图 5.15 双导洞一衬轴力图(单位：t)

图 5.16 双导洞一衬剪力图(单位：t)

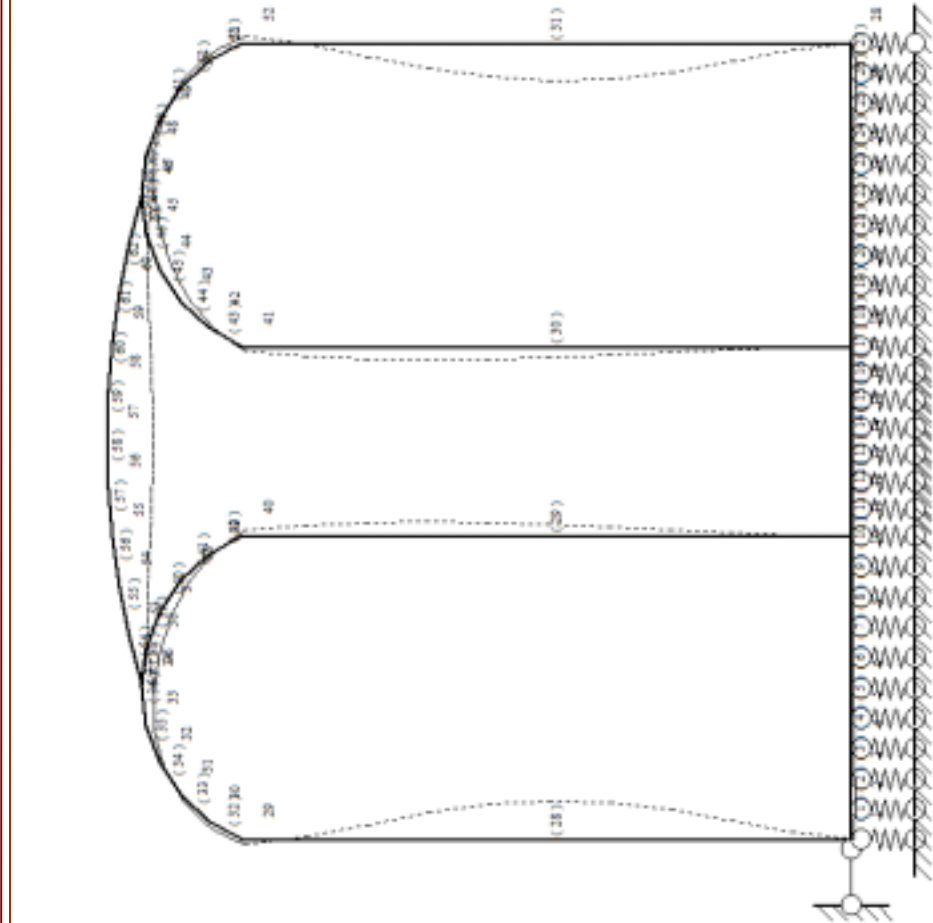


图 5.17 双导洞一衬位移图

三峡大学工程硕士学位论文

表 5-4 双导洞一衬结构联合受力和位移计算成果(单位:m)

杆端 1					杆端 2				
单元码	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角
1	0.00000000	-0.01480827	-0.00813976	-0.00003847	-0.01662156	-0.00025316	-0.00003847	-0.01662156	-0.00025316
2	-0.00003847	-0.01662156	-0.00025316	-0.00007694	-0.01572162	0.00344397	-0.00007694	-0.01572162	0.00344397
3	-0.00007694	-0.01572162	0.00344397	-0.00011542	-0.01372558	0.00457497	-0.00011542	-0.01372558	0.00457497
4	-0.00011542	-0.01372558	0.00457497	-0.00015389	-0.01153771	0.00438711	-0.00015389	-0.01153771	0.00438711
5	-0.00015389	-0.01153771	0.00438711	-0.00019236	-0.00962290	0.00351833	-0.00019236	-0.00962290	0.00351833
6	-0.00019236	-0.00962290	0.00351833	-0.00023083	-0.00820680	0.00235774	-0.00023083	-0.00820680	0.00235774
7	-0.00023083	-0.00820680	0.00235774	-0.00026930	-0.00737110	0.00112447	-0.00026930	-0.00737110	0.00112447
8	-0.00026930	-0.00737110	0.00112447	-0.00030777	-0.00711230	-0.00000569	-0.00030777	-0.00711230	-0.00000569
9	-0.00030777	-0.00711230	-0.00000569	-0.00034625	-0.00731947	-0.00075335	-0.00034625	-0.00731947	-0.00075335
10	-0.00034625	-0.00731947	-0.00075335	-0.00038472	-0.00767772	-0.00051479	-0.00038472	-0.00767772	-0.00051479
11	-0.00038472	-0.00767772	-0.00051479	-0.00042149	-0.00750278	0.00105286	-0.00042149	-0.00750278	0.00105286
12	-0.00042149	-0.00750278	0.00105286	-0.00045826	-0.00697150	0.00124691	-0.00045826	-0.00697150	0.00124691
13	-0.00045826	-0.00697150	0.00124691	-0.00049503	-0.00654859	0.00063879	-0.00049503	-0.00654859	0.00063879
14	-0.00049503	-0.00654859	0.00063879	-0.00053180	-0.00646248	-0.00023890	-0.00053180	-0.00646248	-0.00023890
15	-0.00053180	-0.00646248	-0.00023890	-0.00056857	-0.00671874	-0.00074843	-0.00056857	-0.00671874	-0.00074843
16	-0.00056857	-0.00671874	-0.00074843	-0.00060534	-0.00710309	0.00068344	-0.00060534	-0.00710309	0.00068344
17	-0.00060534	-0.00710309	0.00068344	-0.00064211	-0.00717368	0.00082530	-0.00064211	-0.00717368	0.00082530
18	-0.00064211	-0.00717368	0.00082530	-0.00068069	-0.00675553	-0.00010170	-0.00068069	-0.00675553	-0.00010170
19	-0.00068069	-0.00675553	-0.00010170	-0.00071928	-0.00655241	-0.00144566	-0.00071928	-0.00655241	-0.00144566
20	-0.00071928	-0.00655241	-0.00144566	-0.00075786	-0.00691953	-0.00277459	-0.00075786	-0.00691953	-0.00277459
21	-0.00075786	-0.00691953	-0.00277459						

三峡大学工程硕士学位论文

续表 5-4 双导洞一衬结构联合受力位移计算成果(单位:m)

杆端 1				杆端 2			
单元码	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	
22	-0.00079645	-0.00793488	-0.00277459	-0.00083503	-0.00956365	-0.00398175	
23	-0.00083503	-0.00956365	-0.00398175	-0.00087362	-0.01170552	-0.00486492	
24	-0.00087362	-0.01170552	-0.00486492	-0.00091220	-0.01411899	-0.00502944	
25	-0.00091220	-0.01411899	-0.00502944	-0.00095079	-0.01630849	-0.00377661	
26	-0.00095079	-0.01630849	-0.00377661	-0.00098937	-0.01734697	-0.00001334	
27	-0.00098937	-0.01734697	-0.00001334	-0.00102796	-0.01566606	0.00784515	
28	-0.01036499	-0.01618501	0.01309090	0.00000000	-0.01480827	-0.00813976	
29	0.01407345	-0.00854526	0.01453615	-0.00038472	-0.00767772	-0.00051479	
30	-0.01093477	-0.00801868	-0.01485565	-0.00064211	-0.00717368	0.00068344	
31	0.01381064	-0.01704945	-0.01331196	-0.00102796	-0.01566606	0.00784515	
32	-0.01036499	-0.01618501	0.01309090	-0.01479742	-0.01380328	0.00353429	
33	-0.01479742	-0.01380328	0.00353429	-0.01456461	-0.01411611	-0.00440926	
34	-0.01456461	-0.01411611	-0.00440926	-0.01213724	-0.01785182	-0.00966423	
35	-0.01213724	-0.01785182	-0.00966423	-0.00986252	-0.02415209	-0.01171045	
36	-0.00986252	-0.02415209	-0.01171045	-0.00908296	-0.03105151	-0.01049106	
37	-0.00908296	-0.03105151	-0.01049106	-0.00909110	-0.03159802	-0.01024666	
38	-0.00909110	-0.03159802	-0.01024666	-0.00932277	-0.03332573	0.00321278	
39	-0.00932277	-0.03332573	0.00321278	-0.00756799	-0.02851176	0.01267422	
40	-0.00756799	-0.02851176	0.01267422	-0.00239916	-0.02072757	0.01713988	
41	-0.00239916	-0.02072757	0.01713988	0.00546657	-0.01341099	0.01741087	
42	0.00546657	-0.01341099	0.01741087	0.01407345	-0.00854526	0.01453615	

三峡大学工程硕士学位论文

续表 5-4 双导洞一衬结构联合受力位移计算成果(单位:m)

杆端 1				杆端 2			
单元码	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	
43	-0.01093477	-0.00801868	-0.01485565	-0.00217846	-0.01296647	-0.01766063	
44	-0.00217846	-0.01296647	-0.01766063	0.00579945	-0.02038508	-0.01740337	
45	0.00579945	-0.02038508	-0.01740337	0.01107668	-0.02832973	-0.01306616	
46	0.01107668	-0.02832973	-0.01306616	0.01294064	-0.03343774	-0.00387277	
47	0.01294064	-0.03343774	-0.00387277	0.01273336	-0.03180324	0.01027329	
48	0.01273336	-0.03180324	0.01027329	0.01273256	-0.03165689	0.01033897	
49	0.01273256	-0.03165689	0.01033897	0.01350364	-0.02482831	0.01162087	
50	0.01350364	-0.02482831	0.01162087	0.01576177	-0.01857238	0.00959171	
51	0.01576177	-0.01857238	0.00959171	0.01816152	-0.01487742	0.00431472	
52	0.01816152	-0.01487742	0.00431472	0.01834079	-0.01461354	-0.00368167	
53	0.01834079	-0.01461354	-0.00368167	0.01381064	-0.01704945	-0.01331196	
54	-0.00909110	-0.03159802	-0.01024666	-0.00572815	-0.04490054	-0.02296593	
55	-0.00572815	-0.04490054	-0.02296593	-0.00193968	-0.06424373	-0.02591916	
56	-0.00193968	-0.06424373	-0.02591916	0.00066289	-0.08302670	-0.02145671	
57	0.00066289	-0.08302670	-0.02145671	0.00174072	-0.09633641	-0.01200484	
58	0.00174072	-0.09633641	-0.01200484	0.00183538	-0.10113782	-0.00004511	
59	0.00183538	-0.10113782	-0.00004511	0.00192749	-0.09640605	0.01191851	
60	0.00192749	-0.09640605	0.01191851	0.00299818	-0.08316174	0.02138155	
61	0.00299818	-0.08316174	0.02138155	0.00559115	-0.06442616	0.02586752	
62	0.00559115	-0.06442616	0.02586752	0.00937155	-0.04511032	0.02294832	
63	0.00937155	-0.04511032	0.02294832	0.01273336	-0.03180324	0.01027329	

5.3.4 中洞一、二衬结构联合受力情况
5.3.4.1 中洞二衬结构形成、二衬顶拱无铰、未设拉杆情况

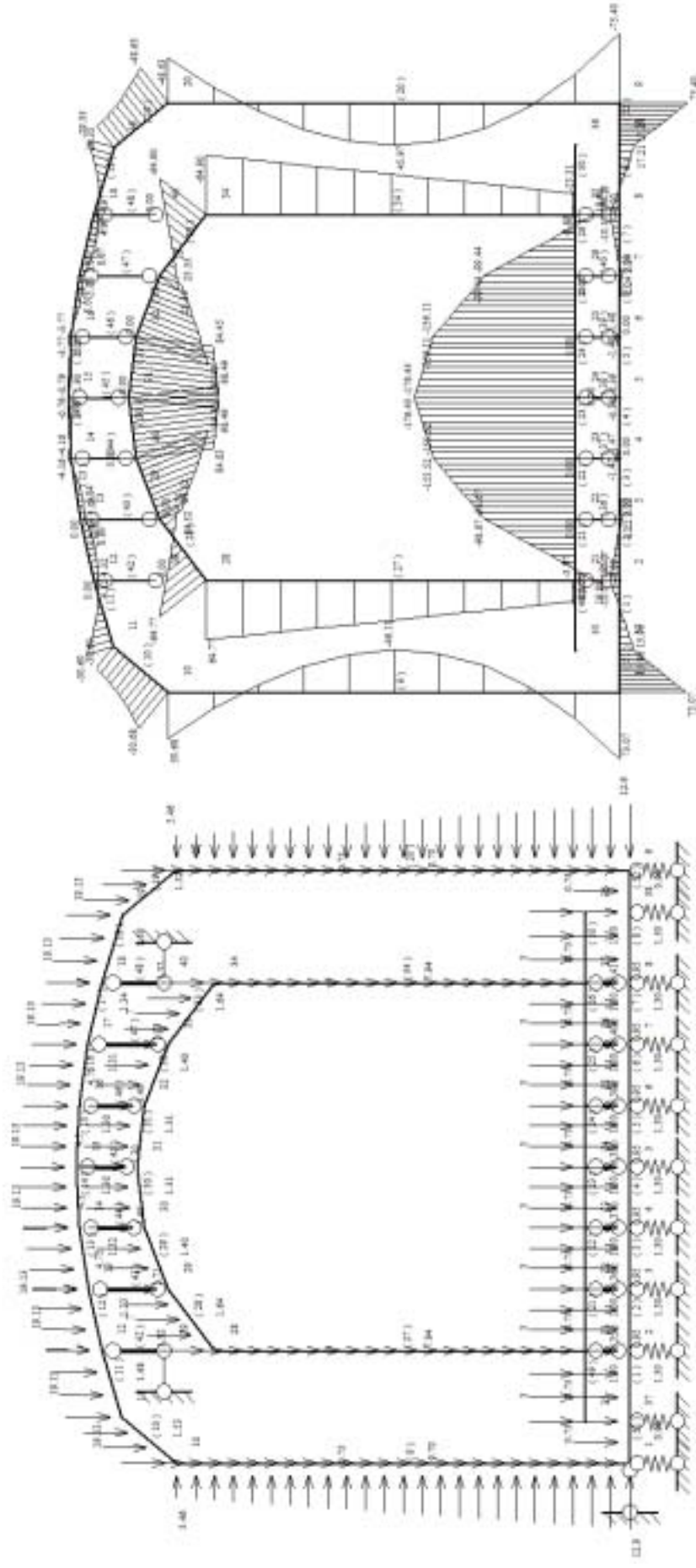


图 5.18 中洞一、二衬结构荷载模型(单位：t/m²)

图 5.19 中洞一、二衬结构 弯矩图(单位：t·m)

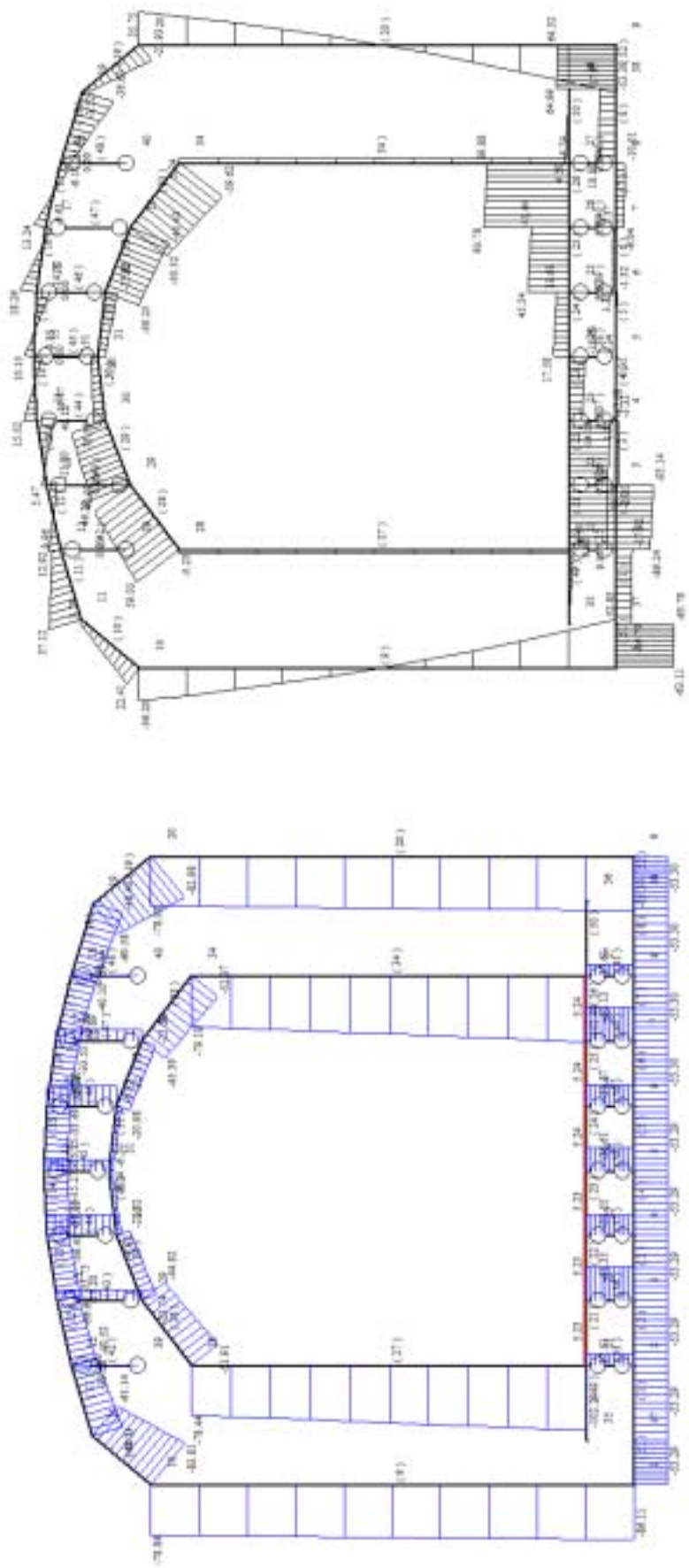


图 5.20 中洞一、二衬结构轴力图(单位：t)

图 5.21 中洞一、二衬结构剪力图(单位：t)

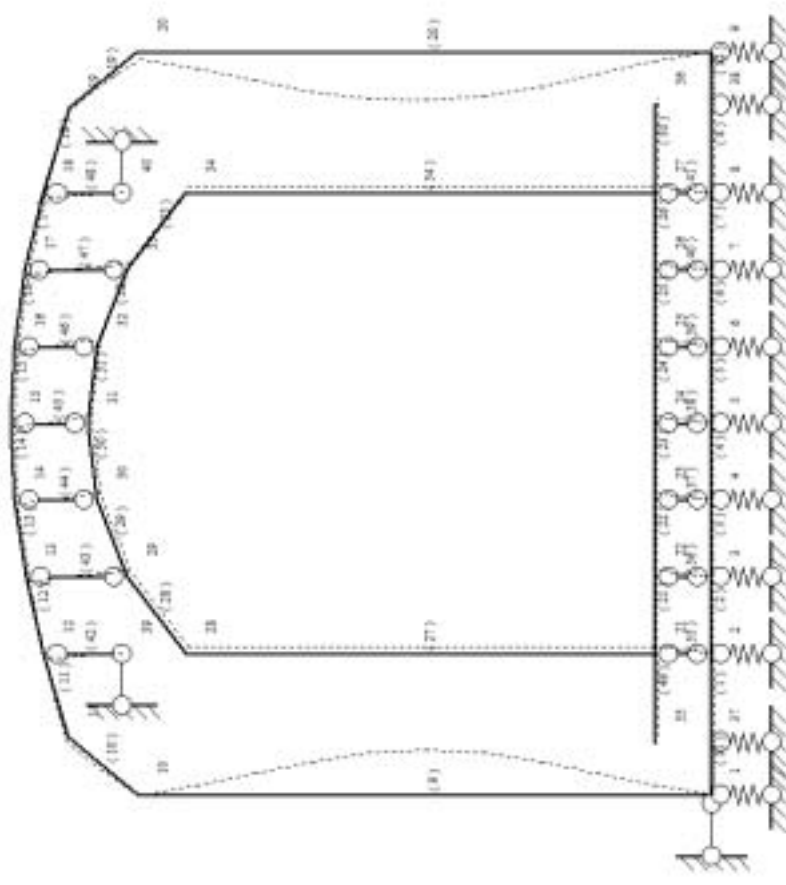


图 5.22 中洞一、二衬结构位移图

三峡大学工程硕士学位论文

表 5-5 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位：m)

杆端 1				杆端 2			
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□	-转角	□
1	-0.00007318	-0.01481818	-0.00126228	-0.00019514	-0.01357762	0.00116896	0.00116896
2	-0.00019514	-0.01357762	0.00116896	-0.00030084	-0.01300526	0.00020772	0.00020772
3	-0.00030084	-0.01300526	0.00020772	-0.00040654	-0.01259792	0.00026104	0.00026104
4	-0.00040654	-0.01259792	0.00026104	-0.00051224	-0.01247770	-0.00003439	-0.00003439
5	-0.00051224	-0.01247770	-0.00003439	-0.00061794	-0.01268519	-0.00032486	-0.00032486
6	-0.00061794	-0.01268519	-0.00032486	-0.00072365	-0.01318028	-0.00028751	-0.00028751
7	-0.00072365	-0.01318028	-0.00028751	-0.00082935	-0.01384067	-0.00119160	-0.00119160
8	-0.00082935	-0.01384067	-0.00119160	-0.00095132	-0.01485894	0.00166205	0.00166205
9	-0.00504962	-0.01074316	0.01706627	0.00000000	-0.00949203	-0.01293920	-0.01293920
10	-0.00504962	-0.01074316	0.01706627	-0.01378811	-0.00373111	-0.00088113	-0.00088113
11	-0.01378811	-0.00373111	-0.00088113	-0.01203142	-0.00998817	-0.00520274	-0.00520274
12	-0.01203142	-0.00998817	-0.00520274	-0.01110744	-0.01455706	-0.00165526	-0.00165526
13	-0.01110744	-0.01455706	-0.00165526	-0.01108584	-0.01517284	-0.00007203	-0.00007203
14	-0.01108584	-0.01517284	-0.00007203	-0.01114613	-0.01543430	-0.00004368	-0.00004368
15	-0.01114613	-0.01543430	-0.00004368	-0.01121113	-0.01526174	0.00004225	0.00004225
16	-0.01121113	-0.01526174	0.00004225	-0.01120744	-0.01471909	0.00149339	0.00149339
17	-0.01120744	-0.01471909	0.00149339	-0.01027965	-0.01042391	0.00504544	0.00504544
18	-0.01027965	-0.01042391	0.00504544	-0.00844819	-0.00400075	0.00117277	0.00117277
19	-0.00844819	-0.00400075	0.00117277	-0.01626179	-0.01020315	-0.01583984	-0.01583984
20	-0.01626179	-0.01020315	-0.01583984	-0.00102450	-0.00896300	0.01383958	0.01383958
21	0.00393264	-0.01357762	0.00045364	0.00393426	-0.01300526	0.00039852	0.00039852

三峡大学工程硕士学位论文

续表 5-5 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位：m)

杆端 1						杆端 2					
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	
22	0.00393426	-0.01300526	0.00039852	0.00039852	0.00393589	-0.01259792	0.00021312	0.00021312			
23	0.00393589	-0.01259792	0.00021312	0.00021312	0.00393751	-0.01247770	-0.00003353	-0.00003353			
24	0.00393751	-0.01247770	-0.00003353	-0.00003353	0.00393914	-0.01268519	-0.00028041	-0.00028041			
25	0.00393914	-0.01268519	-0.00028041	-0.00028041	0.00394076	-0.01318028	-0.00046617	-0.00046617			
26	0.00394076	-0.01318028	-0.00046617	-0.00046617	0.00394239	-0.01384067	-0.00052138	-0.00052138			
27	0.00346060	-0.01380399	-0.00048037	-0.00048037	0.00393264	-0.01357762	0.00045364	0.00045364			
28	0.00346060	-0.01380399	-0.00048037	-0.00048037	0.00399494	-0.01454114	-0.00056640	-0.00056640			
29	0.00399494	-0.01454114	-0.00056640	-0.00056640	0.00423072	-0.01517284	-0.00036023	-0.00036023			
30	0.00423072	-0.01517284	-0.00036023	-0.00036023	0.00425994	-0.01543430	-0.00003413	-0.00003413			
31	0.00425994	-0.01543430	-0.00003413	-0.00003413	0.00427829	-0.01526174	0.00029159	0.00029159			
32	0.00427829	-0.01526174	0.00029159	0.00029159	0.00447938	-0.01471909	0.00049867	0.00049867			
33	0.00447938	-0.01471909	0.00049867	0.00049867	0.00494695	-0.01406860	0.00041401	0.00041401			
34	0.00494695	-0.01406860	0.00041401	0.00041401	0.00394239	-0.01384067	-0.00052138	-0.00052138			
35	-0.00019514	-0.01357762	-0.00434503	-0.00434503	0.00393264	-0.01357762	-0.00434503	-0.00434503			
36	-0.00030084	-0.01300526	-0.00445800	-0.00445800	0.00393426	-0.01300526	-0.00445800	-0.00445800			
37	-0.00040654	-0.01259792	-0.00457097	-0.00457097	0.00393589	-0.01259792	-0.00457097	-0.00457097			
38	-0.00051224	-0.01247770	-0.00468395	-0.00468395	0.00393751	-0.01247770	-0.00468395	-0.00468395			
39	-0.00061794	-0.01268519	-0.00479693	-0.00479693	0.00393914	-0.01268519	-0.00479693	-0.00479693			
40	-0.00072365	-0.01318028	-0.00490990	-0.00490990	0.00394076	-0.01318028	-0.00490990	-0.00490990			
41	-0.00082935	-0.01384067	-0.00502288	-0.00502288	0.00394239	-0.01384067	-0.00502288	-0.00502288			
42	0.00000000	-0.00998817	0.00911126	0.00911126	-0.01203142	-0.00998817	0.00911126	0.00911126			

续表 5-5 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位:m)

杆端 1						杆端 2					
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	
43	0.00399494	-0.01454114	0.00884525	-0.01110744	-0.01455706	0.00884525					
44	0.00423072	-0.01517284	0.01096861	-0.01108584	-0.01517284	0.01096861					
45	0.00425994	-0.01543430	0.01185082	-0.01114613	-0.01543430	0.01185082					
46	0.00427829	-0.01526174	0.01106229	-0.01121113	-0.01526174	0.01106229					
47	0.00447938	-0.01471909	0.00908222	-0.01120744	-0.01471909	0.00908222					
48	0.00000000	-0.01042391	0.00778467	-0.01027965	-0.01042391	0.00778467					
49	0.00393264	-0.01426023	0.00045555	0.00393264	-0.01357762	0.00045364					
50	0.00394239	-0.01384067	-0.00052138	0.00394239	-0.01462487	-0.00052328					
51	0.00000000	-0.00949203	-0.01293920	-0.00007318	-0.01481818	-0.00126228					
52	-0.00095132	-0.01485894	0.00166205	-0.00102450	-0.00896300	0.01383958					

5.3.4.2 中洞二衬结构形成、二衬顶拱无铰、设置拉杆情况

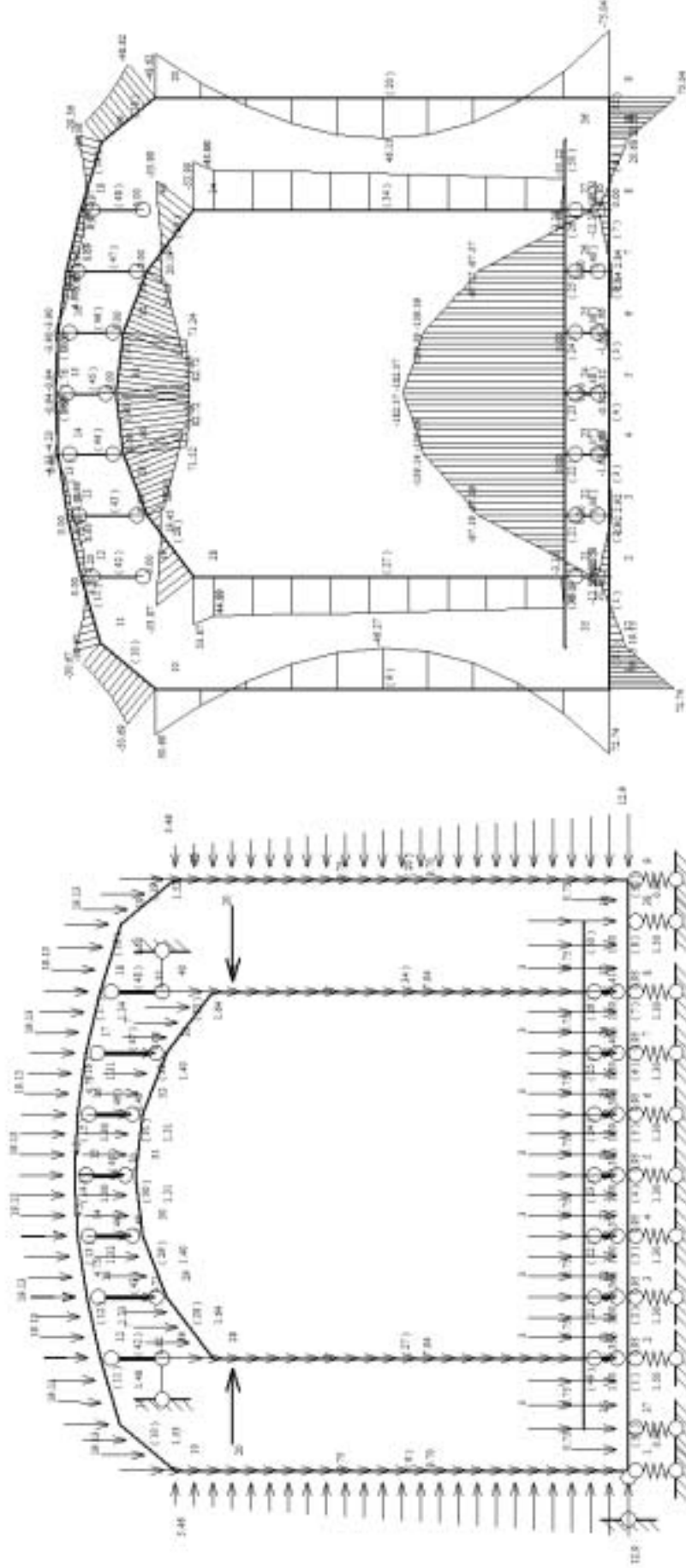


图 5.23 中洞一、二衬结构荷载模型(单位：t/m²)

图 5.24 中洞一、二衬结构弯矩图(单位：t·m)

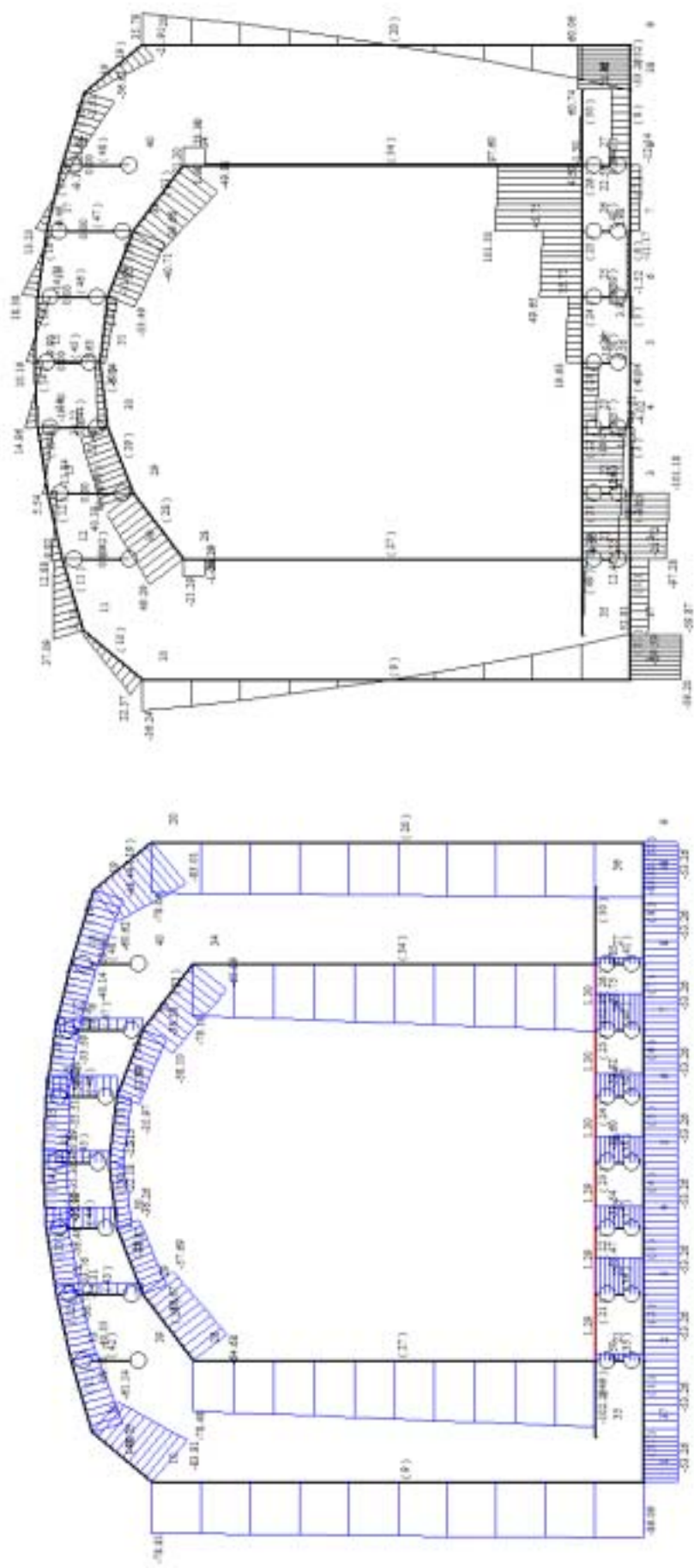


图 5.25 中洞一、二衬结构轴力图(单位：t)

图 5.26 中洞一、二衬结构剪力图(单位：t)

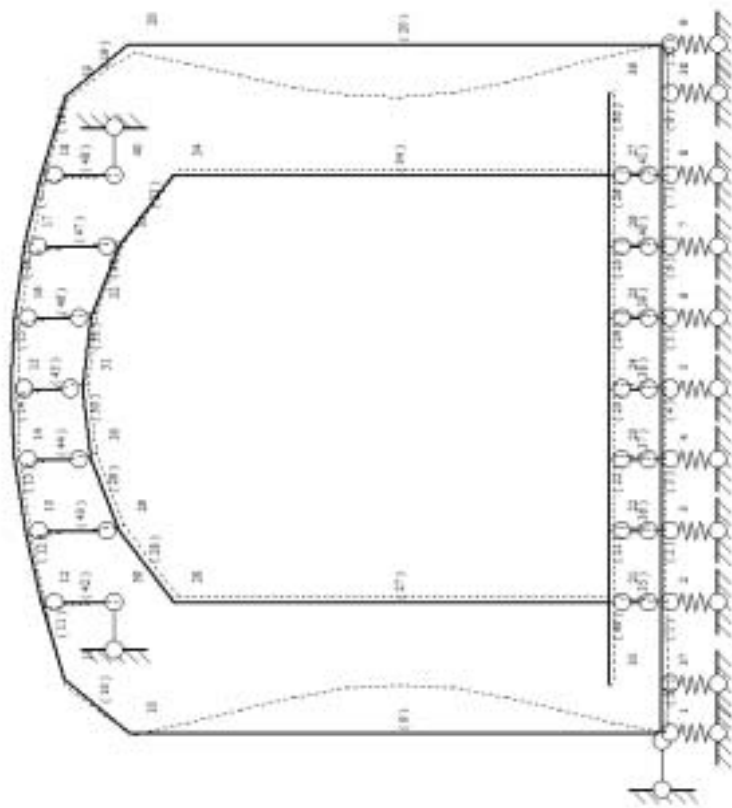


图 5.27 中洞一、二衬结构位移图

三峡大学工程硕士学位论文

表 5-6 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位：m)

杆端 1						杆端 2					
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	
1	-0.00007289	-0.02728654	-0.00184120	-0.00019439	-0.02651715	0.00105810	-0.00019439	-0.02651715	0.00105810	0.00019352	
2	-0.00019439	-0.02651715	0.00105810	-0.00029968	-0.02599381	0.00019352	-0.00029968	-0.02599381	0.00019352	0.00023460	
3	-0.00029968	-0.02599381	0.00019352	-0.00040497	-0.02552458	0.00023460	-0.00040497	-0.02552458	0.00023460	-0.00004907	
4	-0.00040497	-0.02562155	0.00023460	-0.00051027	-0.02574417	0.00032128	-0.00051027	-0.02574417	0.00032128	-0.00031445	
5	-0.00051027	-0.02552458	-0.00004907	-0.00061556	-0.02623899	-0.00031445	-0.00061556	-0.02623899	-0.00031445	-0.00105209	
6	-0.00061556	-0.02574417	-0.00032128	-0.00072086	-0.02688435	-0.00105209	-0.00072086	-0.02688435	-0.00105209	0.00243899	
7	-0.00072086	-0.02623899	-0.00031445	-0.00082616	-0.02724923	0.00243899	-0.00082616	-0.02724923	0.00243899	-0.01355463	
8	-0.00082616	-0.02688435	-0.00105209	-0.00094766	-0.02739575	-0.00170574	-0.00094766	-0.02739575	-0.00170574	-0.00000205	
9	-0.00094766	-0.02724923	0.00243899	-0.00105209	-0.02762636	0.00545072	-0.00105209	-0.02762636	0.00545072	-0.00006136	
10	-0.00652196	-0.02262989	0.01703547	-0.01504506	-0.01214800	-0.00000205	-0.01504506	-0.01214800	-0.00000205	-0.00005532	
11	-0.01504506	-0.01579809	-0.00118981	-0.01314201	-0.02254918	-0.00553185	-0.01314201	-0.02254918	-0.00553185	-0.00170574	
12	-0.01314201	-0.02254918	-0.00553185	-0.01215781	-0.02805780	0.00154297	-0.01215781	-0.02805780	0.00154297	-0.00005532	
13	-0.01215781	-0.02739575	-0.00170574	-0.01214800	-0.02817808	-0.00005532	-0.01214800	-0.02817808	-0.00005532	-0.00006136	
14	-0.01214800	-0.02793416	-0.00000205	-0.01220958	-0.02805780	0.00006136	-0.01220958	-0.02805780	0.00006136	0.00154297	
15	-0.01220958	-0.02817808	-0.00005532	-0.01227738	-0.02762636	0.00154297	-0.01227738	-0.02762636	0.00154297	0.00545072	
16	-0.01227738	-0.02805780	-0.00006136	-0.01228922	-0.02300126	0.00545072	-0.01228922	-0.02300126	0.00545072	-0.00160969	
17	-0.01228922	-0.02762636	0.00154297	-0.01128487	-0.02300126	0.00545072	-0.01128487	-0.02300126	0.00545072	-0.01565323	
18	-0.01128487	-0.02300126	0.00545072	-0.00925752	-0.01592656	0.00160969	-0.00925752	-0.01592656	0.00160969	0.01468643	
19	-0.00925752	-0.01592656	0.00160969	-0.01668974	-0.02181350	-0.01565323	-0.01668974	-0.02181350	-0.01565323	0.01468643	
20	-0.01668974	-0.02181350	-0.01565323	-0.00102056	-0.02056347	0.01468643	-0.00102056	-0.02056347	0.01468643		

三峡大学工程硕士学位论文

续表 5-6 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位:m)

杆端 1						杆端 2					
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	
21	0.00330039	-0.02651715	0.00041025	0.00330096	-0.02599381	0.00036640	0.00330096	-0.02599381	0.00036640	0.00036640	
22	0.00330096	-0.02599381	0.00036640	0.00330152	-0.02562155	0.00019089	0.00330152	-0.02562155	0.00019089	0.00019089	
23	0.00330152	-0.02562155	0.00019089	0.00330209	-0.02552458	-0.00004715	0.00330209	-0.02552458	-0.00004715	-0.00004715	
24	0.00330209	-0.02552458	-0.00004715	0.00330265	-0.02574417	-0.00028525	0.00330265	-0.02574417	-0.00028525	-0.00028525	
25	0.00330265	-0.02574417	-0.00028525	0.00330322	-0.02623899	-0.00046049	0.00330322	-0.02623899	-0.00046049	-0.00046049	
26	0.00330322	-0.02623899	-0.00046049	0.00330378	-0.02688435	-0.00050399	0.00330378	-0.02688435	-0.00050399	-0.00050399	
27	0.00308384	-0.02674203	-0.00041082	0.00330039	-0.02651715	0.00041025	0.00330039	-0.02651715	0.00041025	0.00041025	
28	0.00308384	-0.02674203	-0.00041082	0.00353295	-0.02737921	-0.00048848	0.00353295	-0.02737921	-0.00048848	-0.00048848	
29	0.00353295	-0.02737921	-0.00048848	0.00373109	-0.02793416	-0.00032038	0.00373109	-0.02793416	-0.00032038	-0.00032038	
30	0.00373109	-0.02793416	-0.00032038	0.00375122	-0.02817808	-0.00004753	0.00375122	-0.02817808	-0.00004753	-0.00004753	
31	0.00375122	-0.02817808	-0.00004753	0.00375624	-0.02805780	0.00022515	0.00375624	-0.02805780	0.00022515	0.00022515	
32	0.00375624	-0.02805780	0.00022515	0.00390618	-0.02762636	0.00039420	0.00390618	-0.02762636	0.00039420	0.00039420	
33	0.00390618	-0.02762636	0.00039420	0.00426194	-0.02711053	0.00031777	0.00426194	-0.02711053	0.00031777	0.00031777	
34	0.00426194	-0.02711053	0.00031777	0.00330378	-0.02688435	-0.00050399	0.00330378	-0.02688435	-0.00050399	-0.00050399	
35	-0.00019439	-0.02651715	-0.00367872	0.00330039	-0.02651715	-0.00367872	0.00330039	-0.02651715	-0.00367872	-0.00367872	
36	-0.00029968	-0.02599381	-0.00379014	0.00330096	-0.02599381	-0.00379014	0.00330096	-0.02599381	-0.00379014	-0.00379014	
37	-0.00040497	-0.02562155	-0.00390157	0.00330152	-0.02562155	-0.00390157	0.00330152	-0.02562155	-0.00390157	-0.00390157	
38	-0.00051027	-0.02552458	-0.00401301	0.00330209	-0.02552458	-0.00401301	0.00330209	-0.02552458	-0.00401301	-0.00401301	
39	-0.00061556	-0.02574417	-0.00412444	0.00330265	-0.02574417	-0.00412444	0.00330265	-0.02574417	-0.00412444	-0.00412444	
40	-0.00072086	-0.02623899	-0.00423587	0.00330322	-0.02623899	-0.00423587	0.00330322	-0.02623899	-0.00423587	-0.00423587	

续表 5-6 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位:m)

杆端 1				杆端 2			
单元码	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	□ -转角
41	-0.00082616	-0.02688435	-0.00434730	0.00330378	-0.02688435	-0.00434730	
42	0.00000000	-0.02254918	0.00995230	-0.01314201	-0.02254918	0.00995230	
43	0.00353295	-0.02737921	0.00918986	-0.01215781	-0.02739575	0.00918986	
44	0.00373109	-0.02793416	0.01137145	-0.01214800	-0.02793416	0.01137145	
45	0.00375122	-0.02817808	0.01227754	-0.01220958	-0.02817808	0.01227754	
46	0.00375624	-0.02805780	0.01145095	-0.01227738	-0.02805780	0.01145095	
47	0.00390618	-0.02762636	0.00937668	-0.01228922	-0.02762636	0.00937668	
48	0.00000000	-0.02300126	0.00854591	-0.01128487	-0.02300126	0.00854591	
49	0.00330039	-0.02713466	0.00041215	0.00330039	-0.02651715	0.00041025	
50	0.00330378	-0.02688435	-0.00050399	0.00330378	-0.02764248	-0.00050589	
51	0.00000000	-0.02136967	-0.01355463	-0.00007289	-0.02728654	-0.00184120	
52	-0.00094766	-0.02724923	0.00243899	-0.00102056	-0.02056347	0.01468643	

6.3.4.3 中洞二衬结构形成、二衬拱顶设铰情况

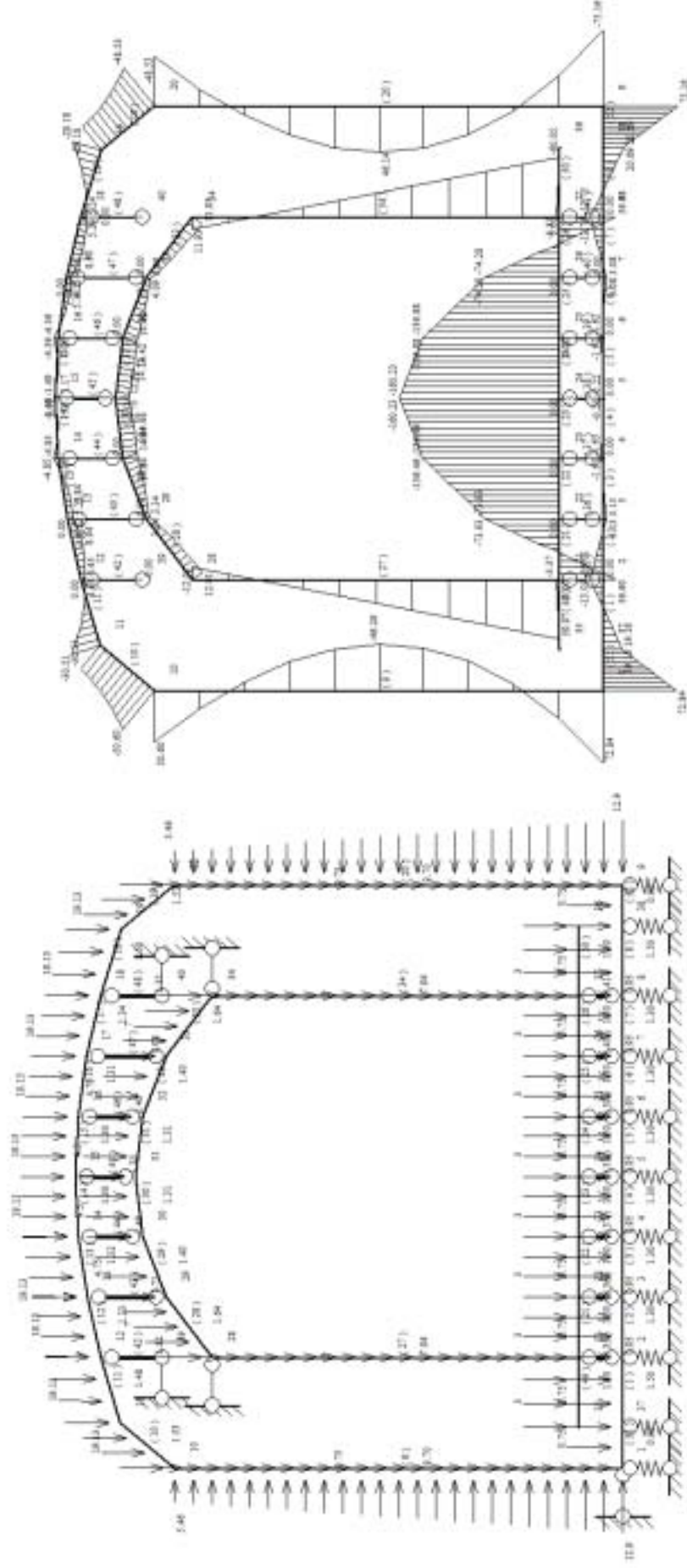


图 5.28 中洞一、二衬结构荷载模型(单位: t/m²)

图 5.29 中洞一、二衬结构弯矩图(单位: t.m)

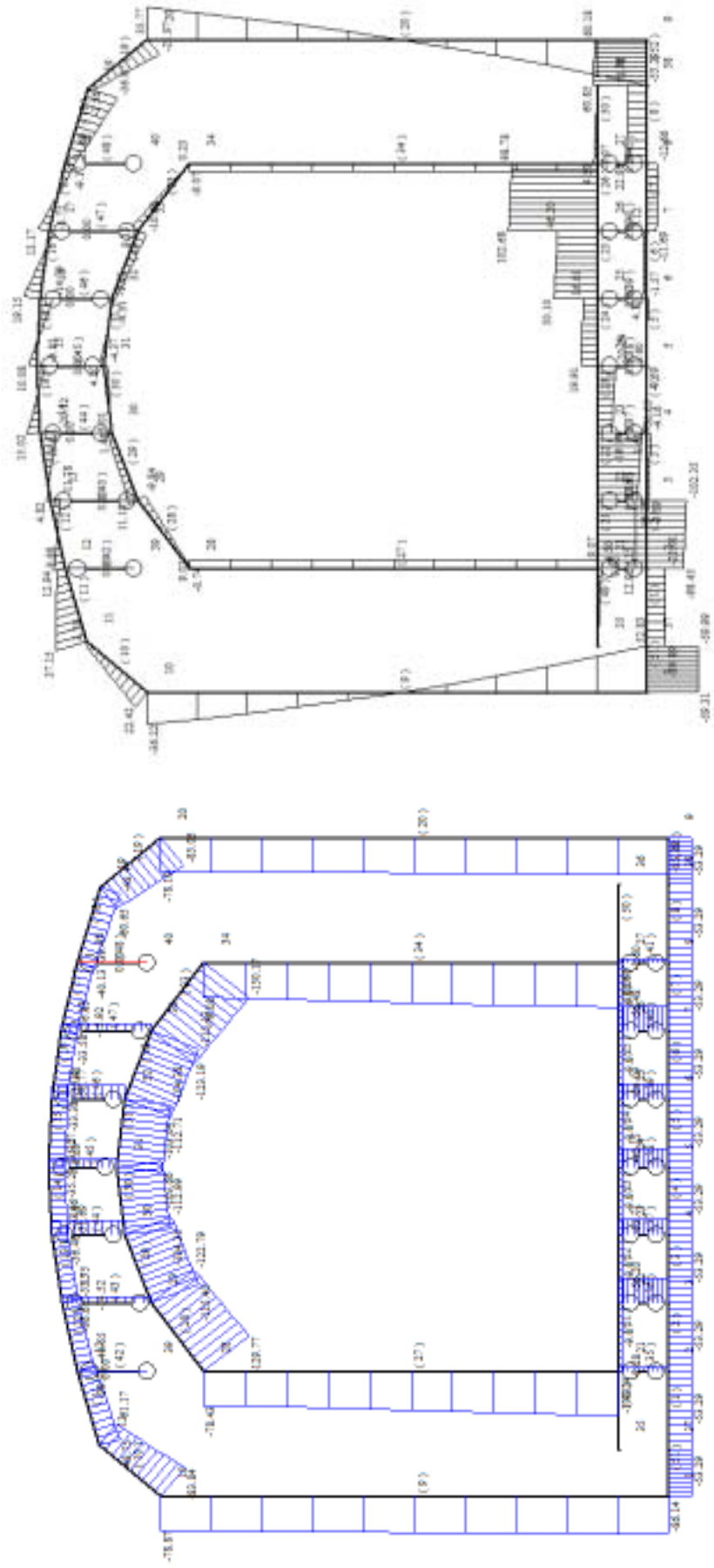


图 5.30 中洞一、二衬结构轴力图(单位：t)

图 5.31 中洞一、二衬结构剪力图(单位：t)

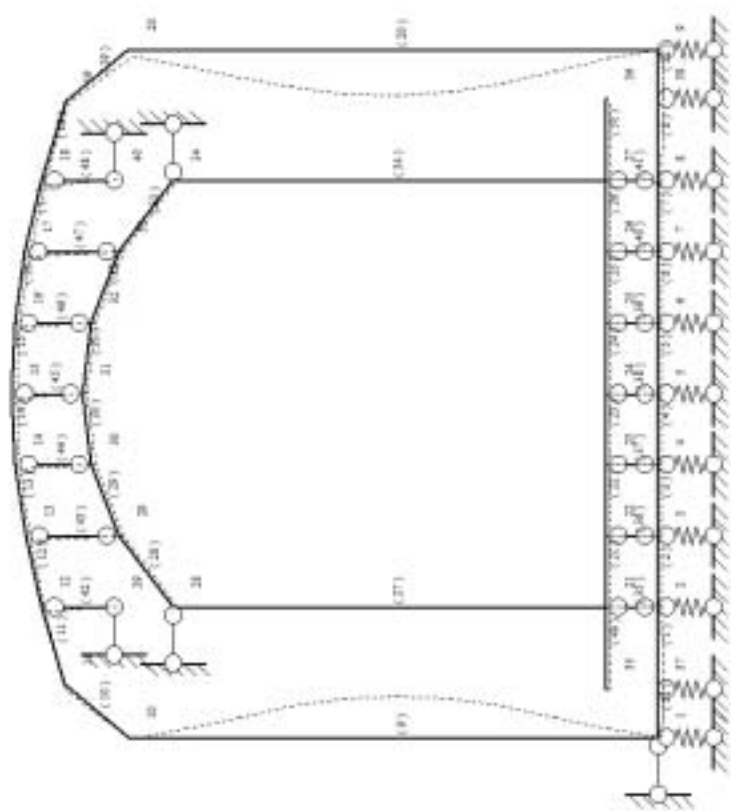


图 5.32 中洞一、二衬结构位移图

三峡大学工程硕士学位论文

表 5-7 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位：m)

杆端 1						杆端 2					
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	
1	-0.00007292	-0.02721757	-0.00180408	-0.00019446	-0.00100758	-0.00019446	-0.02643912	0.00011277	0.00020476	-0.0004867	
2	-0.00019446	-0.02643912	0.00100758	-0.00029979	-0.00051045	-0.00029979	-0.02564267	-0.00082644	-0.00094798	0.00024003	
3	-0.00029979	-0.02602537	0.00011277	-0.00040512	-0.00051045	-0.00040512	-0.02571831	-0.00082644	-0.00094798	-0.00023271	
4	-0.00040512	-0.02571831	0.00020476	-0.00051045	-0.00082644	-0.00051045	-0.02564267	-0.00094798	-0.00094798	-0.000100156	
5	-0.00051045	-0.02564267	-0.00004867	-0.00061578	-0.00023271	-0.00061578	-0.02583993	-0.00082644	-0.00094798	0.00024003	
6	-0.00061578	-0.02583993	-0.00029074	-0.00072111	-0.00023271	-0.00072111	-0.02626854	-0.00082644	-0.00094798	-0.000100156	
7	-0.00072111	-0.02626854	-0.00023271	-0.00082644	-0.00023271	-0.00082644	-0.02680328	-0.00094798	-0.00094798	0.00024003	
8	-0.00082644	-0.02680328	-0.00100156	-0.00094798	-0.00023271	-0.00094798	-0.02717892	-0.00094798	-0.00094798	-0.000100156	
9	-0.00094798	-0.02259386	0.01704178	-0.00000000	-0.00023271	-0.00000000	-0.02133258	-0.00000000	-0.00000000	-0.000100156	
10	-0.00094798	-0.02259386	0.01704178	-0.00000000	-0.00023271	-0.00000000	-0.02133258	-0.00000000	-0.00000000	-0.000100156	
11	-0.01487498	-0.01573318	-0.00113017	-0.01301561	-0.00113017	-0.01301561	-0.02233774	-0.00113017	-0.00113017	-0.000100156	
12	-0.01301561	-0.02233774	-0.00537744	-0.01209230	-0.00537744	-0.01209230	-0.02690672	-0.00537744	-0.00537744	-0.000100156	
13	-0.01209230	-0.02690672	-0.00142612	-0.01213861	-0.00142612	-0.01213861	-0.02707308	-0.00142612	-0.00142612	-0.000100156	
14	-0.01213861	-0.02707308	0.00022453	-0.01220705	0.00022453	-0.01220705	-0.02717359	0.00022453	0.00022453	-0.000100156	
15	-0.01220705	-0.02717359	-0.00005448	-0.01228125	-0.00005448	-0.01228125	-0.02719576	-0.00005448	-0.00005448	-0.000100156	
16	-0.01228125	-0.02719576	-0.00028912	-0.01234509	-0.00028912	-0.01234509	-0.02713903	-0.00028912	-0.00028912	-0.000100156	
17	-0.01234509	-0.02713903	0.00126092	-0.01140614	0.00126092	-0.01140614	-0.02279303	0.00126092	0.00126092	-0.000100156	
18	-0.01140614	-0.02279303	0.00529676	-0.00942287	0.00529676	-0.00942287	-0.01586421	0.00529676	0.00529676	-0.000100156	
19	-0.00942287	-0.01586421	0.00155237	-0.01688782	0.00155237	-0.01688782	-0.02177792	-0.00155237	-0.00155237	-0.000100156	
20	-0.01688782	-0.02177792	-0.01565845	-0.00102090	-0.01565845	-0.00102090	-0.02052679	-0.01565845	-0.01565845	-0.000100156	

三峡大学工程硕士学位论文

续表 5-7 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位：m)

杆端 1						杆端 2					
单元码	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	
21	-0.00035943	-0.02643912	0.00030851	-0.00036204	-0.02602537	0.00029931	-0.00036204	-0.02602537	0.00029931	0.00029931	
22	-0.00036204	-0.02602537	0.00029931	-0.00036465	-0.02571831	0.00015765	-0.00036465	-0.02571831	0.00015765	0.00015765	
23	-0.00036465	-0.02571831	0.00015765	-0.00036726	-0.02564267	-0.00004677	-0.00036726	-0.02564267	-0.00004677	-0.00004677	
24	-0.00036726	-0.02564267	-0.00004677	-0.00036988	-0.02583993	-0.00025124	-0.00036988	-0.02583993	-0.00025124	-0.00025124	
25	-0.00036988	-0.02583993	-0.00025124	-0.00037249	-0.02626854	-0.00039261	-0.00037249	-0.02626854	-0.00039261	-0.00039261	
26	-0.00037249	-0.02626854	-0.00039261	-0.00037510	-0.02680328	-0.00040145	-0.00037510	-0.02680328	-0.00040145	-0.00040145	
27	0.00000000	-0.02666383	-0.00016497	-0.00035943	-0.02643912	0.00030851	-0.00035943	-0.02643912	0.00030851	0.00030851	
28	0.00000000	-0.02666383	-0.00016497	0.00009412	-0.02689387	-0.00013538	0.00009412	-0.02689387	-0.00013538	-0.00013538	
29	0.00009412	-0.02689387	-0.00013538	0.00010901	-0.02707308	-0.00010139	0.00010901	-0.02707308	-0.00010139	-0.00010139	
30	0.00010901	-0.02707308	-0.00010139	0.00007766	-0.02717359	-0.00004716	0.00007766	-0.02717359	-0.00004716	-0.00004716	
31	0.00007766	-0.02717359	-0.00004716	0.00003132	-0.02719576	0.00000692	0.00003132	-0.02719576	0.00000692	0.00000692	
32	0.00003132	-0.02719576	0.00000692	-0.00000159	-0.02713903	0.00004191	-0.00000159	-0.02713903	0.00004191	0.00004191	
33	-0.00000159	-0.02713903	0.00004191	0.00000000	-0.02702927	0.00007277	0.00000000	-0.02702927	0.00007277	0.00007277	
34	0.00000000	-0.02702927	0.00007277	-0.00037510	-0.02680328	-0.00040145	-0.00037510	-0.02680328	-0.00040145	-0.00040145	
35	-0.00019446	-0.02643912	0.00017366	-0.00035943	-0.02643912	0.00017366	-0.00035943	-0.02643912	0.00017366	0.00017366	
36	-0.00029979	-0.02602537	0.00006553	-0.00036204	-0.02602537	0.00006553	-0.00036204	-0.02602537	0.00006553	0.00006553	
37	-0.00040512	-0.02571831	-0.00004260	-0.00036465	-0.02571831	-0.00004260	-0.00036465	-0.02571831	-0.00004260	-0.00004260	
38	-0.00051045	-0.02564267	-0.00015072	-0.00036726	-0.02564267	-0.00015072	-0.00036726	-0.02564267	-0.00015072	-0.00015072	
39	-0.00061578	-0.02583993	-0.00025885	-0.00036988	-0.02583993	-0.00025885	-0.00036988	-0.02583993	-0.00025885	-0.00025885	
40	-0.00072111	-0.02626854	-0.00036698	-0.00037249	-0.02626854	-0.00036698	-0.00037249	-0.02626854	-0.00036698	-0.00036698	

续表5-7 中洞一、二衬结构联合受力位移计算成果(单位:m)

杆端 1				杆端 2			
单元码	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	
41	-0.00082644	-0.02680328	-0.00047510	-0.00037510	-0.02680328	-0.00047510	
42	0.00000000	-0.02233774	0.00985658	-0.01301561	-0.02233774	0.00985658	
43	0.00009412	-0.02689387	0.00713741	-0.01209230	-0.02690672	0.00713741	
44	0.00010901	-0.02707308	0.00877085	-0.01213861	-0.02707308	0.00877085	
45	0.00007766	-0.02717359	0.00944978	-0.01220705	-0.02717359	0.00944978	
46	0.00003132	-0.02719576	0.00879343	-0.01228125	-0.02719576	0.00879343	
47	-0.00000159	-0.02713903	0.00714654	-0.01234509	-0.02713903	0.00714654	
48	0.00000000	-0.02279303	0.00863774	-0.01140614	-0.02279303	0.00863774	
49	-0.00035943	-0.02690402	0.00031041	-0.00035943	-0.02643912	0.00030851	
50	-0.00037510	-0.02680328	-0.00040145	-0.00037510	-0.02740759	-0.00040335	
51	0.00000000	-0.02133258	-0.01352595	-0.00007292	-0.02721757	-0.00180408	
52	-0.00094798	-0.02717892	0.00240003	-0.00102090	-0.02052679	0.01465579	

5.3.5 中洞二衬形成、边洞开挖情况

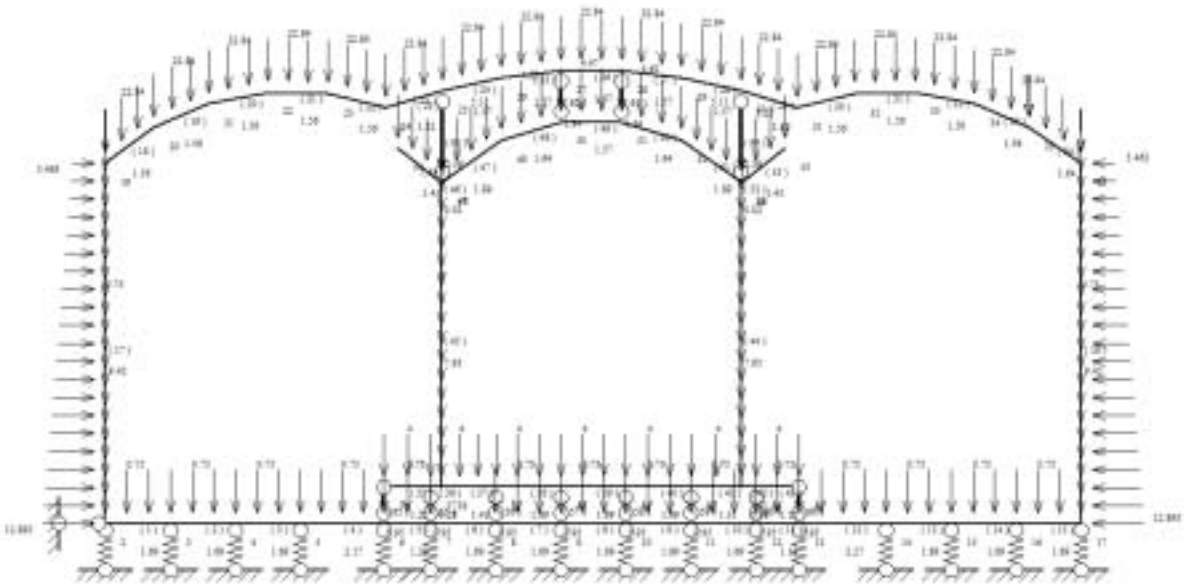


图 5.33 中洞二衬形成、开挖边洞工况荷载模型(单位： t/m^2)

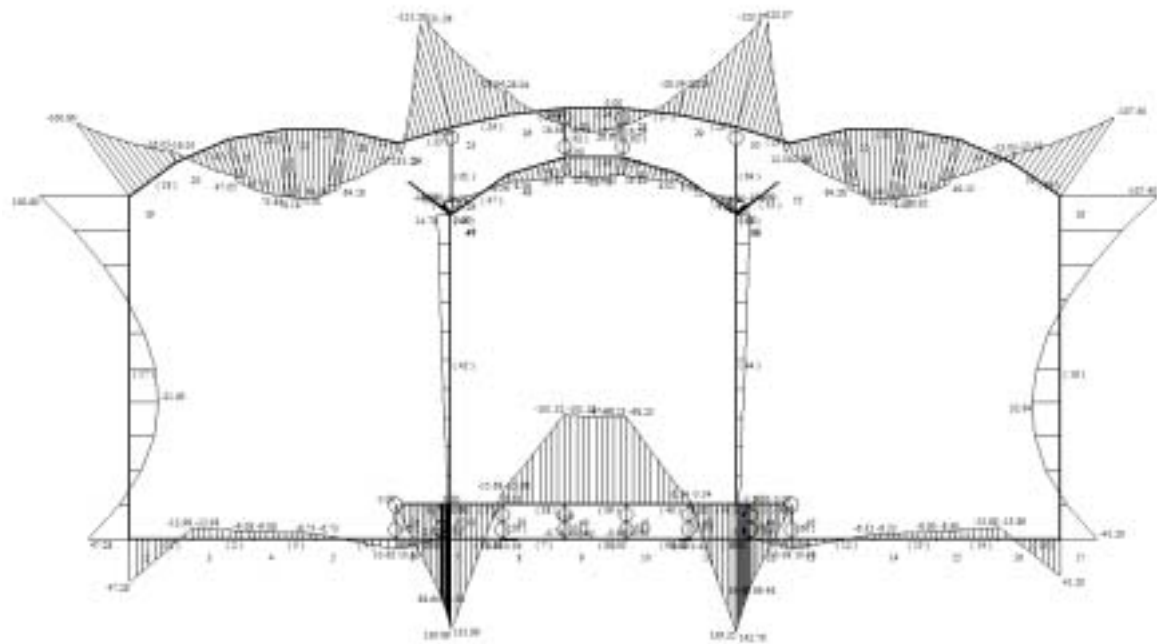


图 5.34 中洞二衬形成、开挖边洞工况弯矩图(单位： $t.m$)

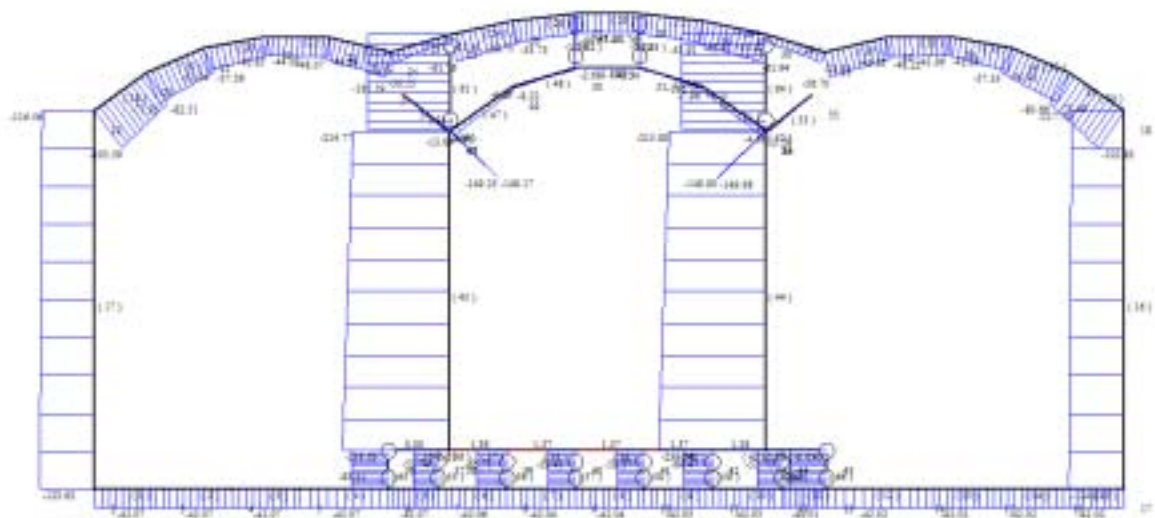


图 5.35 中洞二衬形成、开挖边洞工况轴力图(单位：t)

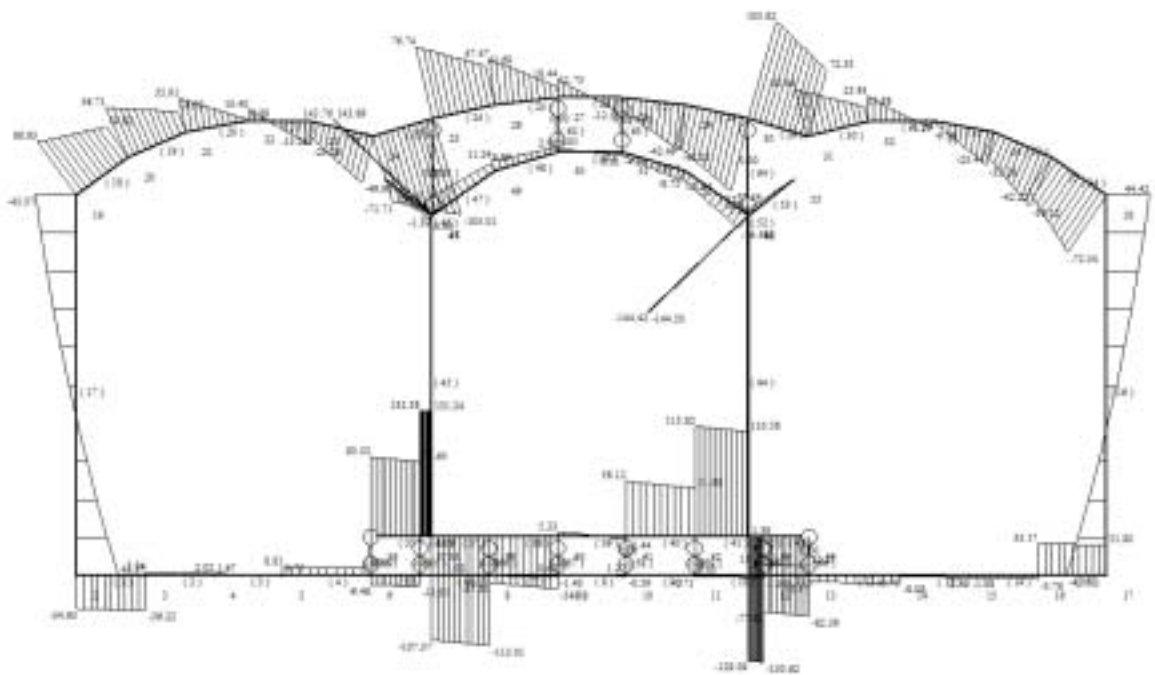


图 5.36 中洞二衬形成、开挖边洞工况剪力图(单位：t)

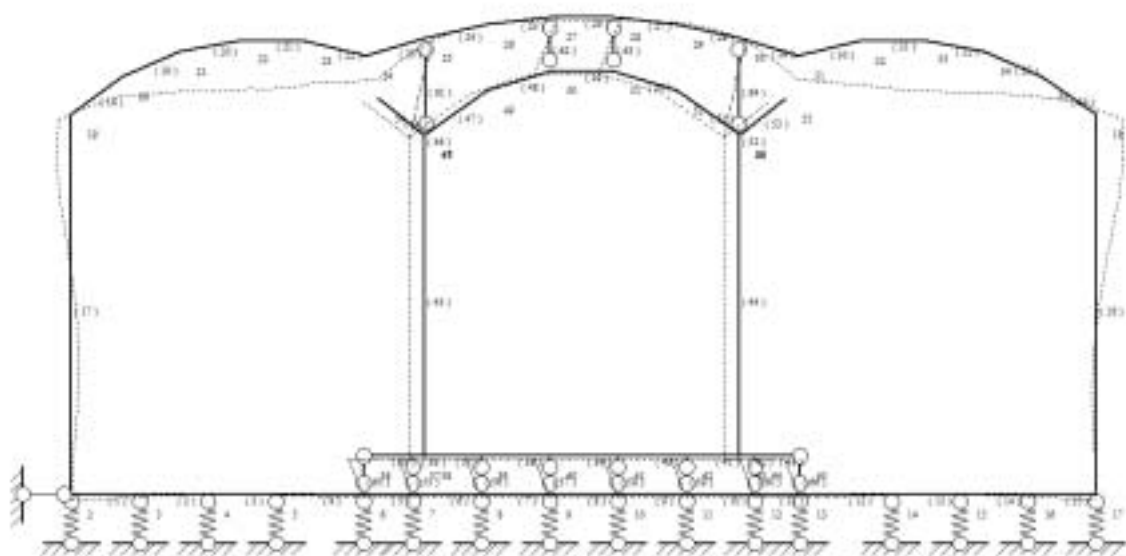


图 5.37 中洞二衬形成、开挖边洞工况位移图

三峡大学工程硕士学位论文

表 5-8 中洞二衬形成、开挖边洞工况位移计算成果(单位:m)

单元码	杆端 1				杆端 2			
	u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角		u -水平位移	v -竖直位移	□ -转角	
1	0.00000000	-0.02807917	0.00158236		-0.00011093	-0.01295740	0.01067193	
2	-0.00011093	-0.01295740	0.01067193		-0.00022186	-0.00193628	0.00204617	
3	-0.00022186	-0.00193628	0.00204617		-0.00033280	-0.00595556	-0.00645176	
4	-0.00033280	-0.00595556	-0.00645176		-0.00047496	-0.02079161	-0.00285553	
5	-0.00047496	-0.02079161	-0.00285553		-0.00055466	-0.02086217	0.00087639	
6	-0.00055466	-0.02086217	0.00087639		-0.00066560	-0.02067519	-0.00008262	
7	-0.00066560	-0.02067519	-0.00008262		-0.00077654	-0.02043067	0.00017375	
8	-0.00077654	-0.02043067	0.00017375		-0.00088748	-0.02040879	-0.00014039	
9	-0.00088748	-0.02040879	-0.00014039		-0.00099842	-0.02059956	0.00008861	
10	-0.00099842	-0.02059956	0.00008861		-0.00110936	-0.02070436	-0.00073769	
11	-0.00110936	-0.02070436	-0.00073769		-0.00118251	-0.02059089	0.00258898	
12	-0.00118251	-0.02059089	0.00258898		-0.00133122	-0.00549041	0.00629084	
13	-0.00133122	-0.00549041	0.00629084		-0.00144216	-0.00153250	-0.00196347	
14	-0.00144216	-0.00153250	-0.00196347		-0.00155309	-0.01252108	-0.01089290	
15	-0.00155309	-0.01252108	-0.01089290		-0.00166402	-0.02933501	-0.00372144	
16	0.08229967	-0.03108799	0.01921523		-0.00166402	-0.02933501	-0.00372144	
17	-0.04059652	-0.02981467	-0.02040415		0.00000000	-0.02807917	0.00158236	
18	-0.04059652	-0.02981467	-0.02040415		-0.00749855	-0.07542044	-0.04516902	
19	-0.00749855	-0.07542044	-0.04516902		0.01925388	-0.13671627	-0.03555956	
20	0.01925388	-0.13671627	-0.03555956		0.02560067	-0.16927100	-0.00468999	
21	0.02560067	-0.16927100	-0.00468999		0.02594817	-0.14876806	0.02999661	
22	0.02594817	-0.14876806	0.02999661		0.04139981	-0.08506057	0.04991521	

三峡大学工程硕士学位论文

续表 5-8 中洞二衬形成、开挖边洞工况位移计算成果(单位：m)

单元码	杆端 1				杆端 2				
	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移
23	0.04139981	-0.08506057	0.04991521	0.02223093	-0.02143630	0.02731256	0.02731256		
24	0.02223093	-0.02143630	0.02731256	0.01952625	-0.01024719	-0.00543473	-0.00543473		
25	0.01952625	-0.01024719	-0.00543473	0.02070120	-0.02163681	-0.00547578	-0.00547578		
26	0.02070120	-0.02163681	-0.00547578	0.02059824	-0.02160642	0.00557138	0.00557138		
27	0.02059824	-0.02160642	0.00557138	0.02180223	-0.00995843	0.00556927	0.00556927		
28	0.02180223	-0.00995843	0.00556927	0.01906288	-0.02129740	-0.02774180	-0.02774180		
29	0.01906288	-0.02129740	-0.02774180	-0.00044570	-0.08605325	-0.05096906	-0.05096906		
30	-0.00044570	-0.08605325	-0.05096906	0.01544870	-0.15157273	-0.03125529	-0.03125529		
31	0.01544870	-0.15157273	-0.03125529	0.01583643	-0.17390906	0.00367855	0.00367855		
32	0.01583643	-0.17390906	0.00367855	0.02197103	-0.14242483	0.03524952	0.03524952		
33	0.02197103	-0.14242483	0.03524952	0.04886423	-0.08081002	0.04599518	0.04599518		
34	0.04886423	-0.08081002	0.04599518	0.08229967	-0.03108799	0.01921523	0.01921523		
35	0.00575266	-0.02079161	-0.00008698	0.00575266	-0.02086231	-0.00000071	-0.00000071		
36	0.00575266	-0.02086231	-0.00000071	0.00575266	-0.02085630	0.00004511	0.00004511		
37	0.00575266	-0.02085630	0.00004511	0.00575357	-0.02067533	0.00017028	0.00017028		
38	0.00575357	-0.02067533	0.00017028	0.00575467	-0.02043081	0.00009161	0.00009161		
39	0.00575467	-0.02043081	0.00009161	0.00575577	-0.02040900	-0.00006487	-0.00006487		
40	0.00575577	-0.02040900	-0.00006487	0.00575687	-0.02059977	-0.00013147	-0.00013147		
41	0.00575687	-0.02059977	-0.00013147	0.00575772	-0.02071422	-0.0000675	-0.0000675		
42	0.00575772	-0.02071422	-0.0000675	0.00575772	-0.02070458	0.00005351	0.00005351		
43	0.00575772	-0.02070458	0.00005351	0.00575772	-0.02059089	0.00012608	0.00012608		
44	0.00573656	-0.02129547	0.00008795	0.00575772	-0.02071422	-0.0000675	-0.0000675		

续表 5-8 中洞二衬形成、开挖边洞工况位移计算成果(单位:m)

单元码	杆端 1				杆端 2					
	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角	u	-水平位移	v	-竖直位移	□ -转角
45	0.00548563	-0.02143485	-0.02143485	-0.00005384	0.00575266	-0.02085630	0.00004511			
46	0.00548563	-0.02143485	-0.02143485	-0.00005384	0.00548573	-0.02143630	-0.00005482			
47	0.00548573	-0.02143630	-0.02143630	-0.00005482	0.00556201	-0.02155532	-0.00007556			
48	0.00556201	-0.02155532	-0.02155532	-0.00007556	0.00558413	-0.02163681	-0.00001918			
49	0.00558413	-0.02163681	-0.02163681	-0.00001918	0.00558277	-0.02160642	0.00005703			
50	0.00558277	-0.02160642	-0.02160642	0.00005703	0.00562213	-0.02146865	0.00011017			
51	0.00562213	-0.02146865	-0.02146865	0.00011017	0.00573597	-0.02129740	0.00008892			
52	0.00573597	-0.02129740	-0.02129740	0.00008892	0.00573656	-0.02129547	0.00008795			
53	0.00573656	-0.02129547	-0.02129547	0.00008795	0.00566078	-0.02120075	0.00008242			
54	0.00553091	-0.02137895	-0.02137895	-0.00004831	0.00548563	-0.02143485	-0.00005384			
55	0.00575266	-0.02086231	-0.02086231	-0.00663929	-0.00055466	-0.02086217	-0.00663929			
56	0.00575357	-0.02067533	-0.02067533	-0.00675703	-0.00066560	-0.02067519	-0.00675703			
57	0.00575467	-0.02043081	-0.02043081	-0.00687496	-0.00077654	-0.02043067	-0.00687496			
58	0.00575577	-0.02040900	-0.02040900	-0.00699290	-0.00088748	-0.02040879	-0.00699290			
59	0.00575687	-0.02059977	-0.02059977	-0.00711083	-0.00099842	-0.02059956	-0.00711083			
60	0.00575772	-0.02070458	-0.02070458	-0.00722850	-0.00110936	-0.02070436	-0.00722850			
61	0.02223093	-0.02143630	-0.02143630	-0.00701132	0.00548573	-0.02143630	-0.00701132			
62	0.02070120	-0.02163681	-0.02163681	-0.01127416	0.00558413	-0.02163681	-0.01127416			
63	0.02059824	-0.02160642	-0.02160642	-0.01119839	0.00558277	-0.02160642	-0.01119839			
64	0.01906288	-0.02129740	-0.02129740	-0.00558006	0.00573597	-0.02129740	-0.00558006			
65	0.00575266	-0.02079161	-0.02079161	-0.00655539	-0.00047496	-0.02079161	-0.00655539			
66	0.00575772	-0.02059089	-0.02059089	-0.00730551	-0.00118251	-0.02059089	-0.00730551			

5.3.6 中洞二衬结构内力计算成果分析

表 5-9 二衬结构内力计算成果比较表

计算模型	计算工况	顶拱跨中 弯矩 M/N (t.m/t)	底板跨中 弯矩 M/N (t.m/t)	备注
三孔一联 整体结构	①正常输水情况	85.6/33.7	135.1/34.2	边孔值
	②建成无水	79.7/38.6	130.9/50.6	
	③检修情况	92.8/29.0	138.3/48.0	
施工过程 中孔结构	④中孔二衬砼形成整体结构	98.5/0	182.6/0	中孔值
	⑤边孔⑧分区开挖完成	20.8/0	101.5/0	

施工过程中一、二衬结构的内力转换复杂，尤其是中洞二衬混凝土提前受力，易导致拱脚拉裂。因施工过程中中孔顶拱、底板轴力接近为零，二衬结构断面及配筋基本由施工过程控制。考虑到左右洞室的掌子面前后错开 15m 的影响，施工期一、二衬结构的实际受力转换更为复杂，以及临时支撑的不确定因素，建议在中孔顶拱的拱脚部位采用工字钢作拉杆，其间距按每根承担 26t~28t 控制。

5.4 暗涵结构计算

根据《南水北调中线一期工程总干渠渠道倒虹吸土建工程初步设计大纲》(长江水利委员会, 2004 年 4 月), 采用《水工钢筋混凝土结构设计规范》(SDJ20-78)进行配筋、抗裂、限裂验算。

根据规范规定, 对温度应力未作计算, 按经验适当增配温度钢筋, 以限制温度裂缝扩展。结构计算结果见表 5-10。

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

表 5-10 高速公路段拱涵结构计算成果表 (M-t.m, N-t)

部位	SDJ20-78 规范配筋计算及抗裂、限裂验算				实际配置(cm ²)	
	三孔一联结构		施工过程中二衬结构			
	工况	M/N	工况	M	实配 Ag	配置
顶板外侧	5	99.17/78.43			39.27	8Φ25
顶板内侧	6	92.78/29.02		98.5	49.26	8Φ28
底板外侧	5	93.33/36.64			49.26	8Φ28
底板内侧	1	135.05/34.23		182.6	49.26	8Φ28
边墙外侧	4	141.77/177.61			49.26	8Φ28
边墙内侧	4	59.21/118.32			39.27	8Φ25
中墙两侧						8Φ22

6 暗挖施工工法对比分析

6.1 施工工法选取原则

- (1) 质量安全高、投资少、工期短的理想原则；
- (2) 施工沉降小（安全）为首选原则；
- (3) 结构质量满足设计及施工规范的要求。

6.2 施工工法概述

根据多年地铁浅埋暗挖的施工经验及相关理论的指导，并联系本工程穿越石太高速公路这一实际情况，主要施工方法有中洞法和边洞法。

(1) 中洞法

首先施作中洞的初期支护及二次衬砌，其后施作边洞。

中洞法又分为中洞--CRD 法和中洞--侧壁导坑法。CRD 法优点是结构整体性较好；缺点是：① 中洞开挖断面达到 11.8m，对左右边洞的土体扰动 6 次；② 施作混凝土结构前，需破除其内部的临时支撑结构，中洞刚度显著减小，该施工时段的路面沉降值会显著增大，不利于结构稳定；③ 由于开挖断面大，初期支护刚度要求高，成本增高。

侧壁导坑法优点是：① 开挖断面小，即将全断面分割为 5 个小洞室，先施工中洞的两侧壁，对左右边洞的土体扰动仅 3 次；② 中洞的两侧墙混凝土浇筑时，不破除临时支撑结构，当中拱初期支护完成后，才分段破除中洞内部的临时支撑结构；③ 施作边洞时，中洞结构已施作完成后，并达到一定的强度，基本上隔断了两个边洞开挖过程中的相互影响，边洞开挖对中洞位置的土体基本上没有扰动；④ 各分部的初期支护与二次衬砌的施工交替进行，在完成两个侧导坑的初期支护后，即展开其中相应部位底板、中隔墙、拱顶结构的施工，其它部位的混凝土结构施工亦紧随初期支护之后。施工断面的扩大与转换均在紧前断面的结构的刚度达到或接近峰值时进行。故侧壁导坑法控制变形的能力较好。缺点是结构混凝土施工分块略多。针对其缺点可以采取对大体积混凝土进行合理分段，加强施工缝处理等措施。

(2) 边洞法

首先施作两边洞的初期支护及二次衬砌，其后施作中洞。优点是结构整体性较好；缺点是：① 边洞开挖断面达到 10.9m，对中洞的土体扰动达 12 次；② 施作混凝土结构前，需破除其内部的临时支撑结构，边洞刚度显著减小，该施工时段的路面沉降值会显著增大，不利于结构稳定；③ 由于开挖断面大，初期支护刚度要求高，成本增高。

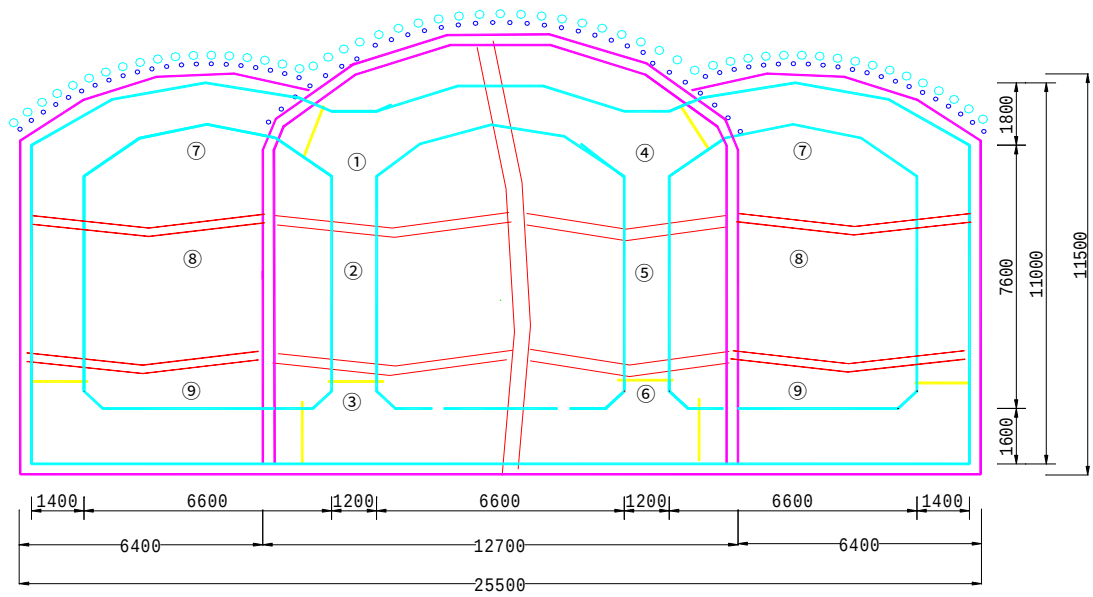


图 6.1 中洞法--CRD 法施工示意图

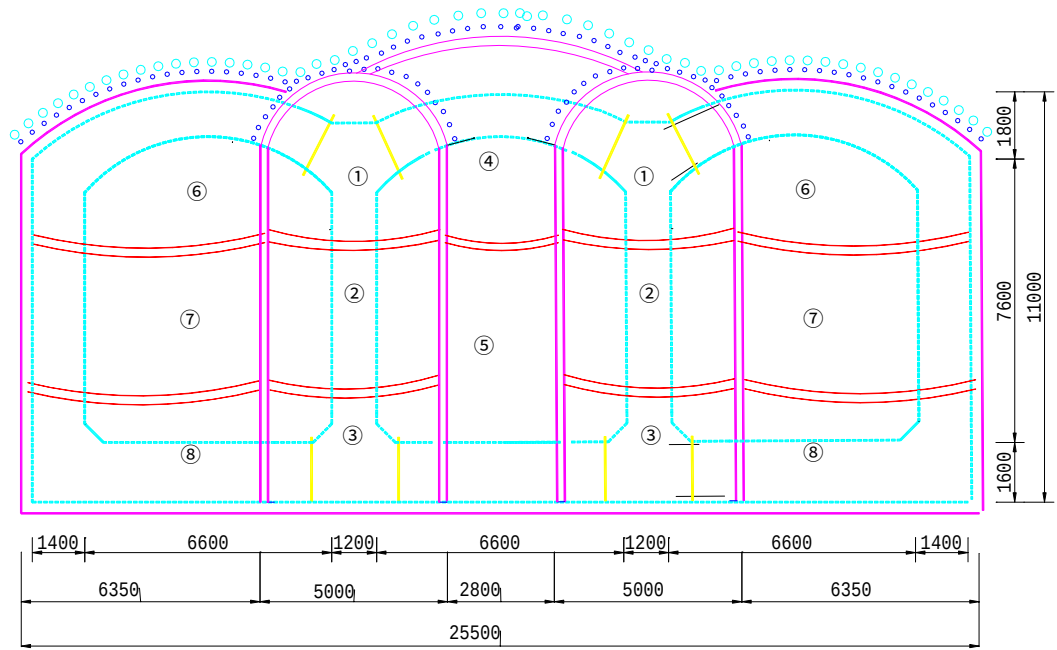
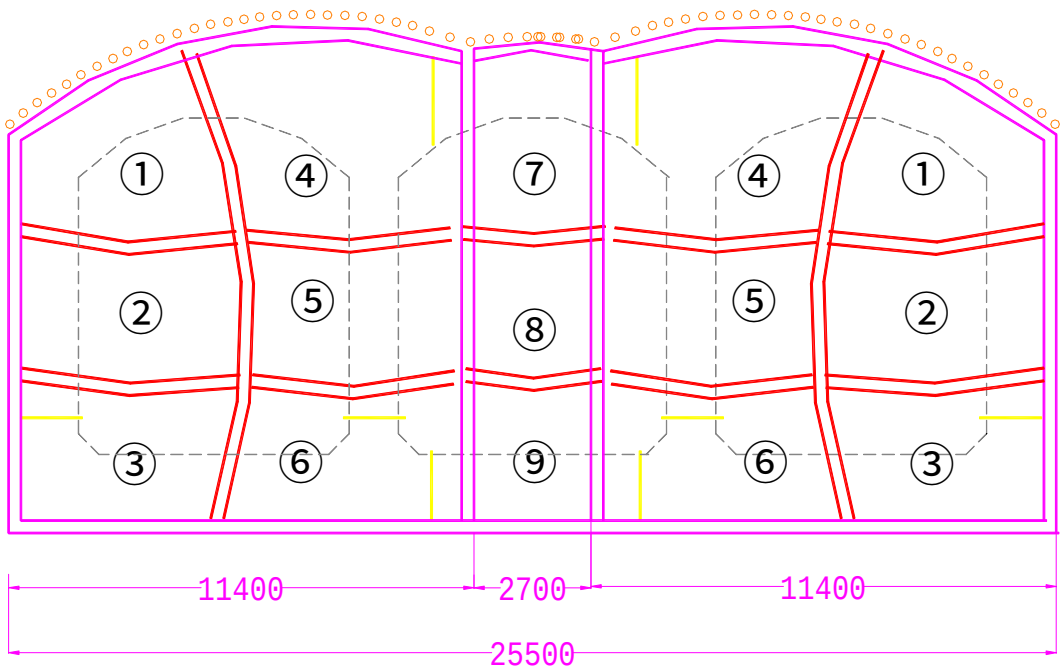


图 6.2 中洞法--侧壁导坑法施工示意图



图

6.3 边洞法施工示意图

6.3 施工沉降控制比较

表 6-1 中洞-侧壁导坑法对洞室扰动次数表

开挖部位	开挖对不同部位土体扰动次数（先开挖左侧导洞）		
	对左洞	对中洞	对右洞
左洞	2	0	2
中洞	2	5	3
右洞	2	0	2
合计	6	5	7

表 6-2 边洞法对洞室扰动次数表

开挖部位	开挖对不同部位土体扰动次数		
	对左洞	对中洞	对右洞
左洞	3	6	2
中洞	0	3	0
右洞	2	6	3
合计	5	15	5

表 6-3 施工工法对洞室扰动次数比较表

开挖工法	开挖对不同部位土体扰动次数		
	对左洞	对中洞	对右洞
中洞法	6	5	7
边洞法	5	15	5
扰动情况评价	相当	中洞法极小	相当

6.4 施工缝位置、数量比较

中洞-CRD 法的施工缝共 8 条，其中竖向施工缝为 4 条；

中洞-侧壁导坑法施工缝共 12 条，其中竖向施工缝为 8 条；

边洞法的施工缝共 8 条，其中竖向施工缝为 4 条。

中洞侧壁导坑法将拱涵中孔分两期完成，每期开挖断面虽小，但在施工上却增加了一道工序；在顶板底板上增加了 4 道施工缝，对于结构的整体性和受力、防渗都不利。

6.5 施工经济性比较

通过对中洞--侧壁导坑法和边洞法初期支护进行设计，中洞--侧壁导坑法每榀格栅重量为 3.87t，边洞法每榀格栅重量为 4.86t。每榀格栅间距为 0.5m，钢材按 5000 元每吨计算，上述两方案投资相差 111.5 万元；中洞-CRD 法增加了中拱混凝土回填 1200m³。中洞--侧壁导坑法工程投资最为经济。

6.6 暗挖施工工法的综合评价

从施工工法的选取原则上讲，基本是以高速路面沉降小（安全）为首选原则，工期和投资原则次之。

根据以上统计和分析，中洞--CRD 法和边洞法开挖施工对边洞位置土体扰动基本相当，而中洞-侧壁导坑法对中洞位置土体扰动大约只有边洞法的 30%左右。

中洞--CRD 法在进行中洞二衬结构混凝土浇筑前拆除洞内临时支撑，结构刚度变化较大，洞内收敛较大。施工工序多、工期长，对控制沉降和结构的安全都是不利的；

中洞--侧壁导坑法在两导洞内浇筑结构混凝土即使拆除临时支护，由于拆除量较小，洞内收敛很小；并且中拱及边洞的初期支护的支撑点在浇筑完成的中隔墙上，施工中拱及边洞二衬前拆除洞内临时支撑对结构刚度影响很小；且施工断面小，施工速度快，符合浅埋暗挖工程的十六字方针。

边洞法在进行两边洞二衬结构混凝土浇筑前拆除洞内临时支撑，结构刚度变化比

中洞--CRD 法还大，洞内收敛更大。施工工序多、工期长，对控制沉降和结构的安全都是不利的；

因此选择中洞--侧壁导坑法是最为稳妥的方法，次之是中洞--CRD 法和边洞法。

7 暗涵施工缝的工程处理

7.1 施工缝状态分析

中洞侧壁导坑法将开挖断面分成 8 个分区。首先依次进行两个中导洞①②③分区的开挖、一衬支护及中墙二衬钢筋混凝土的浇筑；其次进行中孔④⑤分区的开挖、一衬支护及二衬底板、顶拱钢筋混凝土的浇筑；最后进行两个边孔⑥⑦⑧分区的开挖、一衬支护及二衬底板、边墙、顶拱的钢筋混凝土浇筑，如图 7.1。

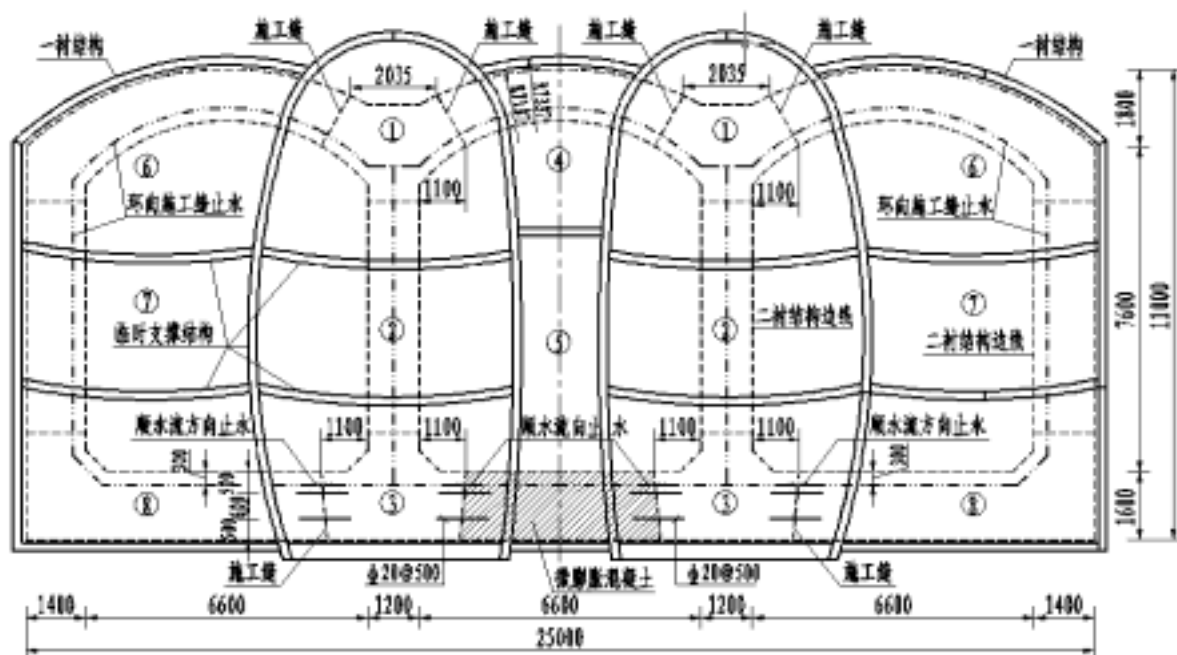


图 7.1 掌子面分区开挖及施工缝处理结构图(单位：mm)

对各部分洞室均采用带临时仰拱的上下台阶法开挖，开挖进尺 0.5m，一期支护紧随开挖进行。支护结构采用 C20 格栅钢架挂网喷混凝土，钢架中距 0.5m，喷混凝土厚度 0.3m。

为抑制高速公路路面出现过大沉降，避免路面开裂，采用大管棚注浆对洞顶土层进行超前预支护。管棚选用 $\phi 159$ 无缝钢管，壁厚 5mm，环向间距 300mm，布设在拱顶 180° 范围内，距离开挖面 300mm；每根管棚长 60m，采用分段连接、水平钻孔引入法施工；钢管内灌 1:1 水泥浆。

各部分洞室开挖时采用小导管注浆对洞壁土层进行超前支护。小导管采用 $\phi 42$ 普通钢管，壁厚 3.25mm，长度 3m，外斜角 19° ，中距 0.3m，

纵向每两榀钢架设一环。针对中细砂层，注浆材料选用水玻璃浆液，注浆压力为 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。

7.2 对施工缝的工程处理

7.2.1 二衬混凝土施工缝型式及处理措施

按照中洞侧壁导坑法施工方案,底板、顶拱混凝土横向是分块进行浇筑的,因此在靠近中墙支座处就形成了4道(共8道)竖向施工缝。沿暗涵纵向每个管节长10m,为保证施工安全二衬混凝土也分块按每5m一个单元进行浇注。这样在每个管节中间也形成了一道竖向施工缝。

受混凝土收缩影响,竖缝极易形成通缝,其对结构的整体性、抗剪和防渗的影响是显而易见的。施工详图阶段为加强结构的整体性,弥补施工方法的缺陷,设计采取了以下处理措施:

- (1) 将竖向施工缝位置调整到弯矩、剪力较小处;
- (2) 为确保一、二期混凝土之间的有效结合,将底板竖向施工缝做成正八字形,将顶拱竖向施工缝做成倒八字形。即将竖缝修改为斜缝,使之在荷载作用下形成一、二期混凝土结构间挤压作用;
- (3) 在中导洞中墙两侧的狭窄空间内,要求钢筋长短布置,满足钢筋接头分布的要求;为满足钢筋的施工要求,钢筋接头的连接要求采用近端直螺纹、远端焊接的方式;
- (4) 为避免中孔底板一、二期混凝土之间因混凝土收缩而形成裂缝,在二期浇筑的混凝土中掺入10%~15%的UEA代替等量水泥,以补偿混凝土收缩变形;
- (5) 为加强结构的整体性,在底板一、二期混凝土施工缝处布置上、下两排 $\Phi 20@500$ 插筋;
- (6) 为防止施工竖缝的渗漏,在底板施工缝处,无论是横向的还是纵向的,都应做好缝面凿毛处理并设平板型止水,与结构伸缩缝止水进行有效的焊接以形成封闭防水系统;
- (7) 为了防止混凝土过大的温度收缩,二期混凝土的浇筑温度不得大于 15°C 。

对施工横缝而言,在老混凝土施工缝面上浇筑新混凝土之前,要求先铺一层厚2~3cm的水泥砂浆,砂浆的水灰比应较混凝土的水灰比减少0.03~0.05。只要混凝土振捣满足规范要求,新浇混凝土在自重作用下,就可保证上下层新、老混凝土的有效结合。因此,对施工横缝不再考虑处理措施。

7.2.2 中洞二衬结构受力转换问题

施工过程中一、二衬结构的内力转换复杂,尤其是中洞二衬混凝土提前受力,易导致拱脚拉裂。因施工期间中孔顶拱、底板轴力接近为零,二衬结构断面及配筋基本由施工过程控制。考虑到左右洞室的掌子面前后错开15m的影响,施工期一、二衬结

构的实际受力转换更为复杂,以及临时支撑的不确定因素,建议在中孔顶拱的拱脚部位采用工字钢作拉杆,其间距按每根承担 26t~28t 控制。

中洞侧壁导坑法最先利用两中墙承受竖向荷载,因中墙基底面积小,对底部一衬的刚度和强度要求较高。为避免过大的地基沉降,施工过程中对中墙的稳定性的稳定性亦不容忽视。

7.2.3 对二衬结构的其他影响及分析

为避免二衬混凝土受一衬混凝土(糙面)的约束产生裂缝,通常在一、二衬之间加一层低密度聚乙烯板作为防水隔离层。本工程一衬混凝土厚度为 0.3m,二衬边墙厚度为 1.4m,一衬混凝土对二衬混凝土的约束影响甚微,无需设隔离层。

7.2.4 综合分析评价

(1) 浅埋暗挖工法在实施过程中不可避免地会产生竖向施工缝,它对二衬结构的影响是显而易见的,因此做好对施工缝的处理直接关系到暗渠结构的工程安全。

(2) 施工过程中一、二衬结构的内力转换复杂,中孔二衬结构提前受力,致使顶拱、底板跨中弯矩及中墙底部弯矩较大,因此在结构上采取适当的加强措施是必要的。

(3) 为加强结构的整体性,建议的处理措施可概括为“调位置、留八字、设插筋、埋止水、微膨胀”。

8 暗挖施工效果分析

8.1 施工沉降观测系统设计

为及时监测施工沉降量,确保高速公路的安全,在高速公路北侧路基、北侧路肩、中央隔离带和南侧路肩处共布设 A、B、C、D 四排沉降标点。

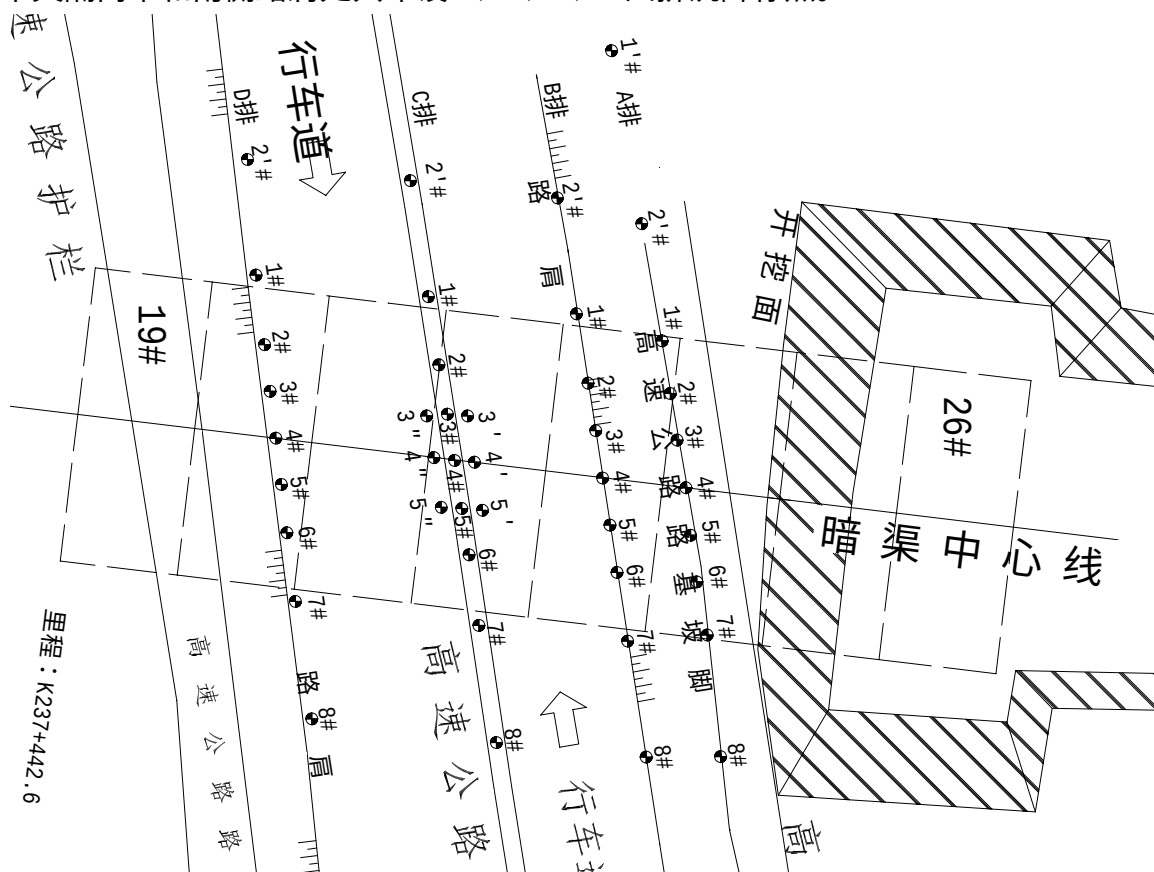


图 8.1 高速公路路面沉降标点布置图

开挖面距量测断面前后 $<2B$ 时,量测频率为 2 次/d, $<5B$ 时,1 次/2d, $>5B$ 时,1 次/周 (B 为开挖跨度)。

由于浅埋暗挖的施工较复杂,施工结构的受力随着开挖步序不断变化,量测频率根据施工步序进行安排。

8.2 施工沉降监测资料分析

穿高速浅埋暗挖段于 2006 年 7 月 4 日开始大管棚作业,至 2008 年 7 月完成 26# 管节混凝土的浇筑,历时 2 年。

2006 年 10 月 22 日,在中导洞①部开挖过程中,高速路政部门发现路面出现较大沉降,暗挖工程被迫停工。

据现场观察,高速北侧洞顶排水沟处出现多处裂缝;中央隔离带出现局部下沉形

三峡大学工程硕士专业学位论文

成的曲线；中央隔离带南北两侧的超车道路面与行车道相比，均出现车轮压痕及凹陷。现场量测路面沉降情况见表 8-1。

表 8-1 高速公路路面沉降数值表

沉降布置	排序	最大沉降点	最大沉降值(cm)	备 注
高速北侧洞顶排水沟	A 排	A-4	4.0	
高速北侧路肩防撞栏处	B 排	B-3	5.7	
高速中央隔离带处	C 排	C-3 '	4.6	
		C-3	9.2	
		C-3 ''	4.2	
高速南侧路肩防撞栏处	D 排	D-4	3.1	

沉降主要原因概括为四个方面：一是透水事故，二是管棚水钻法施工，三是拱脚砂层，四是超大动荷载。

(1) 透水事故引起

大管棚施工从 2006 年 7 月 4 日开始，于 8 月 19 日完工。

8 月 5 日凌晨 5 点，在进行大管棚 81# 孔钻进时，发生了透水事故。由古运河建设项目部协调引河管理局，自早 7 点多开始紧急放水。经过项目部及施工队的大力抢救，终于在 9 点排除了险情，将管棚在生态河的漏水处完全堵上。由于基坑的水较多，同时使用两台水泵抽水，到下午，基坑基本清理完毕，施工队可以恢复工作。

项目部立即处理 81# 孔：将水流所冲刷的洞口部位用水泥封上，预留了 3 根长 1m 的注浆管。并马上进行了管棚管内注浆，在注入 24 袋水泥后即发生串浆。停歇 5 个小时后，进行了预留注浆管注浆，注入 34 袋水泥后，又发生了串浆。这时在对 77# 孔管棚注浆时，发现注浆量远远超过了正常水平，即浆液进入了 81# 孔位的空洞，经过 7 个多小时的注浆，在注入 130 袋水泥后，终于发生了从 81# 孔端口回浆。再采取其他的一些注浆补救措施后，发现效果很差，遂认为 81# 冲刷所留下的空洞基本已回填满实。81# 孔总计注入 188 袋水泥（约 12.7 m³）。

根据实测资料，在 81# 管棚位置发生透水事故，灌浆处理后发现，在 73# 管棚位置的路面出现较大沉降，透水部位与最大沉降位置轴线相距 6.3m，实测中央隔离带处沉降值已达 3cm。自 8 月 19 日全部大管棚施工完毕，以后几天，每天路面沉降 1cm。9 月 16 日开始土方洞挖，10 月 22 日发现路面出现较大沉降而被迫停工。从沉降影响时间看，基本符合沉降影响滞后 1~2 月的规律。

据施工单位现场人员描述，透水时，在高速北侧 81# 管棚位置形成直径约 60cm 的水柱，高速南侧进水口位置找不到。从早 5 点到 9 点，历时 4 个小时。大量的河水

势必带走路基土体。而水泥浆干缩性较大,通过二、三次灌浆,很难将土体空隙处充填密实。

高速路面高程为 88m,管棚作业高程约 81~82m,覆土较厚,从这方面可以解释透水引起路面较大沉降而未引起局部塌坑的原因。

(2) 管棚水钻法施工引起

大管棚使用水平定向钻法,管棚长度为 60m,管棚规格为:Φ159(壁厚 5 mm),其中每根管节长分别有 6m、4.5m、3m,接口处焊接牢固。钻进过程中,要严格勘测各节的倾角,把倾角控制在 0.5(百分度)内。并将钻头分为 12 点、9 点、6 点、3 点(导向板朝上为 12 点),如果打设角度偏下,则将钻头调到 12 点,直接顶进;如果打设角度偏上,则将钻头调到 6 点,直接顶进。大管棚在打设完毕后,进行管内注浆。注浆采用水灰比为 1:1 的水泥浆(浆液比重 $1.48 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$),注浆压力控制在 0.3~0.7MPa,个别二次注浆压力可达到 1~2 MPa。每根管棚四周被水冲刷约 2.5 cm,直径按 21 cm 计算,则理论注浆量为 2.1 m^3 (约 28 袋水泥),实际注浆量为平均每根管棚 2.15 m^3 (约 29 袋水泥)。

存在问题:

①管棚钻进采用水钻法工艺施工,使管棚周围与土体之间约有 2.5cm 空隙。从施工质量看,如采用地质钻钻进效果要好得多。

②原设想在大管棚注浆的同时,利用管棚端部射水孔向管棚周围充填灌浆,即回浆 60m,将管棚外壁与周围土体的空隙充填密实。从高速南侧外露的管棚看,少量管棚并未注满,更谈不上回浆。

③管棚水钻法施工引起的导向偏差较大,高速南侧外露管棚排列错乱,左洞、中洞处管棚错落,甚至管棚竖向排列,右洞处管棚出露较少。施工过程中也发现,因管棚偏差较大,致使管棚无法钻进。由管棚引起的对土体的扰动较大,可能形成空隙。

(3) 导洞开挖时一衬拱脚砂层引起

根据施工记录,一衬拱顶最大下沉 2.9cm。分析认为,一衬强度、刚度应无问题,沉降主要是由于拱脚、底板处砂层引起。

从沉降点位置看,最大沉降处基本位于暗渠中心线位置,中心沉降最大,两侧趋小,与两中导洞开挖引起的沉降叠加规律吻合。

①部土体开挖时拱脚部位已见 0.8~1.2m 细砂层,但拱脚并未进行小导管注浆加固。施工过程中拱脚砂层常有坍塌发生。

拱顶部位为黄土状壤土,未进行小导管注浆。如拱顶部位进行小导管注浆加固的话,应能充填由管棚施工引起的空隙。

台阶开挖时,拱脚部位砂层被扰动;一衬混凝土不能及时封闭;一衬与土体之间

的回填注浆不及时；回填灌浆难以形成封闭面，效果不理想。

擅自开挖中导洞①部土体之间的④部土体，实际进洞约 5m。

(3) 路面超大动荷载引起

石太高速公路是晋煤外运的重要通道，车辆一般载重为 70~80 吨，较大载重为 150~200 吨，超载现象较普遍。

因暗挖施工工艺复杂，交通导改方案难以实施。施工过程中高速并未导改，亦未实现减速。

洞顶土体在下部临空，上面车辆反复震动，加之土体本身有空隙，拱脚砂层未注浆加固，引起路面沉降在所难免。

施工沉降处理措施：

- (1) 对管棚内进行充填灌浆，增加管棚刚度；
- (2) 对中央隔离带沉降较大处进行灌浆试验。灌浆管由洞内向上打入，因上部有大管棚，灌浆管难以进入管棚上部土体，能否将管棚上部土体内的空隙充填密实，尚待现场试验研究；
- (3) 对拱脚处砂层采用超前小导管注浆加固后，再开挖；
- (4) 施工单位提出加大格栅钢架连接板底部的受力面积，采用 $600 \times 600 \times 10\text{mm}$ 的钢板垫底；
- (5) 与高速部门协调，力争实行交通导改及限速措施；
- (6) 对沉降路面进行恢复，避免车辆在洼陷处形成二次冲击荷载。

2007 年 7 月下旬，左、右侧中墙混凝土浇筑完成，2007 年 8 月底，中洞二衬混凝土形成整体结构，至 2008 年 7 月暗挖工程完工，高速路面未有大的沉降情况发生，路堤土体基本处于稳定状态，洞室也未再出现塌方现象。

综上所述，前期施工沉降主要由透水事故、管棚水钻法施工、拱脚砂层和超大动荷载引起，与施工工法关联不大。当左、右侧中墙混凝土浇筑完成后，中洞侧壁导坑法后期施工沉降量很小，符合施工工法的选取原则。

9 结论与展望

南水北调中线京石段应急供水工程（河北段）中，暗渠类建筑物共 2 座，即古运河暗渠和石津渠暗渠。古运河暗渠洞身段长 435m，需依次下穿省道 S101（一级公路）、古运河和石太高速公路。为满足穿高速公路浅埋暗挖施工的需要，洞身结构采用三孔一联圆拱直墙型式，单孔过水断面尺寸为 $6.6\text{m} \times 8.2\text{m}$ （宽 $\times$ 高）。

石津渠暗渠洞身段长 150m，需依次下穿引岗黄输水管线、石阎公路（一级公路）和石津总干渠。因采用传统的基槽明挖法施工，洞身结构采用三孔一联箱涵型式，单孔过水断面尺寸为 $6.6\text{m} \times 7.8\text{m}$ （宽 $\times$ 高）。

在暗渠工程可行性研究、初步设计和施工详图设计过程中，通过深入调研、学习和研究，对大孔径暗涵结构设计理念有了更清楚的认识。尤其是暗渠下穿高速公路的设计方案、洞室布置、断面型式、受力状态、施工工法优选及其对主体结构的影响分析和处理措施、路面沉降原因分析等，对解决大孔径暗涵结构设计及浅埋暗挖施工过程中存在的一些技术难题，具有重要的意义。

在设计和施工中，结合本论文的工作内容，可以得出如下结论：

（1）根据国内地铁施工经验，对于 10m 以下的浅埋土洞常采用基槽明挖、基坑支护明挖、浅埋暗挖、箱涵顶进、盾构机掘进等施工方法。通过对明、暗挖方案的比较认为，基槽明挖方案虽然优点明显，但临时工程费用较高。此外，高速公路断道带来的附属工程设计和协调工作也很繁杂；浅埋暗挖方法虽然施工工序多，施工工艺有一定难度，施工过程中结构各构件受力转换复杂，但具有技术成熟、施工灵活、风险小、工程造价低、能保证高速公路的正常运营等优点。为最大限度地减少对高速公路的影响和干扰，暗涵下穿高速公路宜采用浅埋暗挖法施工技术；

（2）暗挖洞型的结构方案应根据暗渠工程总体布置、暗挖段与上下游明挖段的连接、暗涵孔径大小等因素综合分析确定；对三孔一联整体穿越情况，洞身断面型式宜采用圆拱直墙型式，对小孔径分离式相邻布置情况，洞身断面宜采用箱型，对大孔径分离式小净距布置情况，洞身断面宜为马蹄形；

（3）采用《水利水电工程微机程序集》中“G-13 多孔涵洞内力的有限元法分析及配筋计算程序”、Sap84 程序及结构力学求解器 V1.5 等程序，分别对三孔一联整体结构和施工过程中孔结构进行了内力计算。施工过程中一、二衬结构的内力转换极其复杂，尤其是中洞二衬混凝土提前受力，易导致拱脚拉裂。因施工过程中中孔顶拱、底板轴力接近为零，二衬结构断面及配筋基本由施工过程控制。考虑到左右洞室的掌子面前后错开施工的影响，施工期一、二衬结构的实际受力转换更为复杂，以及临时支撑的不确定因素，建议在中孔顶拱的拱脚部位采用工字钢作拉杆，其间距按每根承担 26t~28t 控制；

(4) 对暗涵下穿高速公路工程,宜以施工沉降小(安全)为首选原则。根据中洞法和边洞法的比较,中洞--侧壁导坑法施工断面的扩大与转换均在紧前断面的结构的刚度达到或接近峰值时进行,控制变形的能力较好,洞内收敛很小。且施工断面小,施工速度快,符合浅埋暗挖工程的十六字方针。对三孔一联拱涵整体穿越的布置情况,中洞--侧壁导坑法是最为稳妥的方法,其次是中洞--CRD法和边洞法;中洞--侧壁导坑法的缺点是结构混凝土施工分块略多;

(5) 浅埋暗挖工法在实施过程中不可避免地会产生竖向施工缝,它对二衬结构的影响是显而易见的,因此做好对施工缝的处理直接关系到暗渠结构的工程安全。为加强结构的整体性,建议的处理措施可概括为“调位置、留八字、设插筋、埋止水、微膨胀”;

几点展望:

(1) 浅埋暗挖法施工技术被广泛应用于城市地铁、市政工程、地下过街通道等工程中,在水利工程中应用较少。随着国内基建规模的扩大,更多的高速公路、铁路网的建成使用,对新建水利工程的施工方法提出了更高的要求,传统的基槽明挖设计显然已经不能满足高速公路和铁路正常运营的要求。目前,南水北调中线工程已经进入全面实施阶段,自总干渠引水、东西走向的南水北调配套工程也已开始可行性研究设计。今后,暗渠、倒虹吸类工程穿越高速公路、铁路的工程会越来越多,应用前景广阔。

(2) 浅埋暗挖涵洞设计实际是确定施工方法、支护手段和衬砌结构于一体的过程。在解析设计中,结构力学模型视衬砌为拱形结构,视围岩为荷载。这样的计算模型虽然有悖于地下结构物的本质特征,但由于其计算思路简单、明晰,因而得到了广泛的应用。按此模型设计的一、二衬结构往往比较保守;岩石力学模型,一是将围岩和支护看作是一个共同工作的整体,二是尽可能用非线性本构关系模拟围岩的真实特性。通过数值分析加以实现,其关键在于计算模型和本构关系的处理。因施工工序复杂,现场作业情况、施工质量难以掌握,按此模型设计的一、二衬结构可能与实际相差较大。优化洞室布置,改进断面型式,细化施工工序,简化力学模型,借鉴工程类比,将成为水利工程浅埋暗挖设计的关键;

(3) 由于作业条件和周边环境等因素的限制,目前浅埋暗挖法修建地下工程的施工速度相对较慢,工序多、接口多、小型机械投入不多,制约了浅埋暗挖法的进一步推广应用。实践证明,通过优化组合、改进施工方法等措施,能进一步提高施工速度,降低施工风险,确保质量。如采用信息化设计法补充和丰富传统的经验类比设计法,选择适宜的辅助施工措施,选择合理的支护参数和施工方法以降低工程风险等。

三峡大学工程硕士专业学位论文

参考文献

- [1]王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].安徽:安徽教育出版社,2004.
- [2]刘钊,余才高,周振强.地铁工程设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3]关宝树,国兆林.隧道及地下工程[M].成都:西南交通大学出版社,2000.
- [4]张照煌 李福田编著,全断面隧道掘进机施工技术,北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5]余彬泉,陈传灿编著,顶管施工技术.北京:人民交通出版社,1998.
- [6]孙更生,郑大同.软土地基与地下工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1984.
- [7]梁炯 .锚固与注浆技术手册[M].北京:中国电力出版社,1999.
- [8]钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1988.
- [9]李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [10]龙驭球,包世华.结构力学教程[M].北京:高等教育出版社,1988.
- [11]大连工学院,天津大学主编.结构力学(下册).北京:高等教育出版社,1980.
- [12]龙驭球编.弹性地基梁的计算.北京:人民教育出版社,1981.
- [13]天津大学主编.土力学与地基.北京:人民交通出版社,1980.
- [14]徐芝纶.弹性力学问题的有限单元法(修订版)[M].北京:水利电力出版社,1978.
- [15]徐秉业,刘信声.应用弹塑性力学[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [16]熊启钧.涵洞[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [17]余际可,罗尚生,等.倒虹吸管[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [18]陈宝华,张世儒.水闸[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [19]熊启钧,高昌侠.隧洞[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [20]赵文华.水工建筑物(第二版)[M].北京:水利电力出版社,1987.
- [21]周志祥.高等钢筋混凝土结构[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [22]汪树玉.优化方法及其在水工中的应用[M].北京:水利电力出版社,1993.
- [23]丁丽娟.数值计算方法[M].北京:北京理工大学出版社,2004.
- [24]王国鼎.拱桥连拱计算[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [25]赵志方,周厚贵,袁群等.新老混凝土粘结机理研究与工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [26]潘家铮.水工建筑物的温度控制[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [27]朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

- [28]赵志缙.新型混凝土及其施工工艺[M].北京:中国建筑工程出版社,1986.
- [29]邓进标,邹志军,韩伯鲤,等.水工混凝土建筑物裂缝分析及其处理[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1998.
- [30]黄国兴,惠荣炎.混凝土的收缩[M].北京:中国铁道出版社,1990.
- [31]叶琳昌,沈义.大体积混凝土施工[M].北京:中国建筑工程出版社,1987.
- [32]王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工程出版社,1997.8.
- [33]龚召熊,张锡祥,肖汉江,等,水工混凝土的温控与防裂[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [34]罗国强,罗刚,等.混凝土与砌体结构裂缝控制技术[M].北京:中国建材工业出版社,2006.
- [35]刘兴法.混凝土结构的温度应力分析[M].北京:人民交通出版社,1985.3
- [36]储传英.三峡工程混凝土原材料研究[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [37]李继业,张玉稳.公路工程施工质量问题与防治[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [38]丁春林,王春河.双线隧道暗挖施工技术及其数值模拟分析[J].地下空间,2002,4.
- [39]杨世武.淤泥质地层浅埋暗挖施工技术措施[J].铁道工程学报.2003,2.
- [40]冯海,杨哲峰.浅埋暗挖技术在卵砾石地层隧洞施工中的应用[J].北京水利.2005,4.
- [41]赵玉奎,程炜.城市地铁超大断面浅埋暗挖施工技术[J].地铁与轻轨.2002,3.
- [42]汤勇洛.超浅埋及超高断面结构暗挖施工技术[J].铁道勘察.2005,2.
- [43]施仲衡.浅埋暗挖法设计理论论述[J].现代隧道技术.2005,2.
- [44]王福柱,马锁柱,张振刚,谭忠诚.浅埋暗挖双连拱隧道施工力学分析[J].铁道建筑.2003,8.
- [45]王刚,崔天麟.中洞法修建浅埋暗挖连拱隧道施工技术[J].西部探矿工程.2005,11.
- [46]张云.浅埋暗挖单拱大跨地下车站施工技术[J].建筑施工.2006,3.
- [47]余建恩.浅埋大跨隧道衬砌施工技术[J].西部探矿工程.2003,9.
- [48]李小红.大跨度隧道浅埋软岩段施工技术[J].铁道建筑技术.1999,3.
- [49]孔德岩.隧道浅埋段开挖及支护施工技术[J].浙江建筑.2006,4.
- [50]黎亚生.拉市隧洞暗涵改建段顶管设计[J].云南水力发电.2002年,z1.
- [51]崔炜,付云升,陈重华,韩宇,李雪春.浅埋暗挖输水隧洞的施工可行性和安全性研究[J].南水北调与水利科技.2006,3.
- [52]戴显强,张洪忠.地铁浅埋暗挖群洞施工中受力转换技术的探讨[J].铁道标准设

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

计.2003, 7.

[53]王暖堂,陈瑞阳,谢菁.城市地铁复杂洞群浅埋暗挖法施工技术[J].岩土力学.2002, 2.

[54]赵玉奎,程炜.城市地铁超大断面浅埋暗挖施工技术[J].西部探矿工程.2003, 2.

[55]王春林.地铁隧道施工对地层变形的影响--浅埋暗挖法对地层变形的影响[J].科技资讯.2006, 8.

[56]高怀志,李养平.浅埋暗挖法在天津地铁 1 号线工程中的应用[J].隧道建设.2005, 4.

[57]范富国.北京地铁 5 号线磁器口车站中洞法施工技术[J].城市轨道交通研究.2004, 4.

[58]姜景山,陈浩.地铁沉降的注浆恢复施工[J].铁道勘察.2005, 5.

[59]李文波.鹤洞大桥大体积混凝土的温度控制及防裂[J].桥梁建设, 1999, (3)

[60]白继中,贾海亮,辛雁清.水工混凝土裂缝的研究[J].山西水利科技, 2000(1).

[61]朱岳明,贺金仁,刘勇军,等.龙滩水电站大坝混凝土温控防裂研究[R].南京:河海大学, 2002, 12.

[62]刘勇军.水工混凝土温度与防裂技术研究[D].南京:河海大学, 2002, 12.

[63]王赫,顾建生.关于大体积混凝土温度控制的若干问题[J].施工技术, 1997, 10.

[64]赵士怀,黄夏东,等.高层建筑大体积混凝土结构温度裂缝控制技术[J].施工技术, 1998, 5.

[65]游宝坤.混凝土建筑结构裂缝控制的技术措施[J].建筑结构, 2002, 10.

[66]李继文,任庆国.控制大体积钢筋砼裂缝的主要方法[J].山东建材, 1997, 5.

[67]李晓峰.混凝土施工过程温度与裂缝预控[J].陕西建筑, 2006, 3: 33-37.

[68]文权,韩素芳.混凝土工程裂缝预防与控制[J].混凝土, 2003, (5)

[69]郭仕万,肖欣.混凝土施工中的裂缝控制[J].山西水利科技, 2000, (4)

[70]邱云力.大体积混凝土施工的裂缝预控[J].人民珠江, 2006, (4)

[71]中华人民共和国国家标准. GB 50157-92, 地下铁道设计规范[S].

[72]中华人民共和国国家标准. GB 50299-1999, 地下铁道工程施工及验收规范[S].

[73]中华人民共和国行业标准. SL 279—2002, 水工隧洞设计规范[S].

[74]中华人民共和国行业标准. SL 265—2001, 水闸设计规范[S].

[75]中华人民共和国行业标准. SL 253—2000, 溢洪道设计规范[S].

[76]中华人民共和国行业标准. SL 319—2005, 混凝土重力坝设计规范[S].

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

- [77]中华人民共和国行业标准. DL 5077—1997, 水工建筑物荷载设计规范[S].
- [78]中华人民共和国行业标准. SDJ 20-78, 水工钢筋混凝土结构设计规范[S].
- [79]中华人民共和国行业标准. SL/T 191—96, 水工混凝土结构设计规范[S].
- [80]中华人民共和国行业标准. JTG B01—2003, 公路工程技术标准[S].
- [81]中华人民共和国行业标准. JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [82]中华人民共和国行业标准. JTG D70—2004, 公路隧道设计规范[S].
- [83]中华人民共和国国家标准. GB 50086—2001, 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].
- [84]中华人民共和国行业标准. SL 377—2007, 水利水电工程锚喷支护技术规范[S].
- [85]中华人民共和国行业标准. DL/T 5181—2003, 水电水利工程锚喷支护施工规范[S].
- [86]中华人民共和国行业标准. DL 5144—2001, 水工混凝土施工规范[S].
- [87]中华人民共和国行业标准. DL/T 5169—2002, 水工混凝土钢筋施工规范[S].
- [88]中华人民共和国行业标准. JTG F10—2006, 公路路基施工技术规范[S].
- [89]中华人民共和国行业标准. JTJ 017—96, 公路软土地基路堤设计与施工技术规范[S].
- [90] Yamaguchi, I; yamazaki, I; Kiritani, Y. Study of Ground-Tunnel Interaction of Four Shield tunnels Driven in Close Proximity in Relation to Design and Construction of Parallel Shield Tunnels. Tunneling and Underground Space technology. Volume 13, Issue 3, July 9, 1998, PP.289-304.
- [91] Dick. M; Jagues. P. A. Tunnel Construction. Internation Journal of Rock Mechanics Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Vol. 32, Issue 4, June, 1995, PP.193A.
- [92] Rajinder Bhasin, Eystein Grimstad. The use of stress-strength Relationships in the Assessment of Tunnel Stability. Tunneling and Underground Space Technology. 1996, 11(1):93-98.
- [93] Pierre Chambon, Jean-Francois corte. Shallow Tunnels in Cohesionless Soil: Stability of Tunnel Face. Journal of Geotechnical Engineering. Vol. 120, No. 7. July 1994. PP.1148-1165.
- [94] Arutyunyan NKh , Metlov VV. Some problems in the theory of free creep in bodies with

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

variable boundaries. *Meehof Solids*, 1982, 17(5):92

[95] J·B·Burlan, J·R·Standing, F·M·Jardine. *Buildingres Ponsetotunneling, easestudies from eonstiuctionofthe JubileeLineExtension*, London, and Vol.I:ProjeetandMethod[C]. London, ThomasTelfordPublicshing, 2001. PP509-545.

[96] R·J·Mair, R·NTaylor, A·Braeegirdle(1993). *Subsurface Settelement Profiles above Tunnelsin Clays*. *Geotechnique*, V143, No.2, PP315-320.

[97] B , Brenner , T.Neff(2000). *design and management for underground uncertainty on the central Artery/tunnel Projeet*. *North Ameriean tunneling*, 00. PP13-21.

[98] B.B.Goyaletal.(2000) *Under pinning of red line south station*. *North Ameriean tunneling* 00. PP83-88.

[99] S·B·Chang, S.J.Moon, (2001). *Construction case of large section tunnels for the subway station inKorea,as Peets of the design and construction*. *Progress in tunneling after2000*, Tauseher, P.andA. Colombo(eds.), Vol.III, 87-92

[100] P.Lunardi, G.Cassani.(2001). *Construotion of an underpass at the Ravone railway yard in the city of BOLOGNA:aspects of the design and construction*. *Progress in turnneling after 2000*, Tauscher, P. and A.Colombo(eds.), Vol. III, 319-328

附录：攻读工程硕士学位期间发表的部分科研成果

1. 梁信宝. 古运河暗渠穿石太高速公路设计方案优选[J]. 水科学与工程技术, 2006, 6 (总第 134 期)
2. 梁信宝, 景书达, 孙卫军, 张恒. 古运河暗渠浅埋暗挖施工工法对结构的影响分析[J]. 水科学与工程技术, 2007, 3 (总第 137 期)

三 峡 大 学 工 程 硕 士 专 业 学 位 论 文

致 谢

紧张而又充实的工程硕士研究生学习即将结束，在毕业论文完成之际，谨向在论文研究期间，给予过作者帮助的各位老师和同事致以衷心的感谢。

本论文是在导师张国栋教授、霍继申教高悉心指导完成的。从论文选题、方案的确立、结果分析以及论文撰写等每一个环节无不倾注着导师的巨大心血。导师的严谨治学态度，渊博的学识，开拓的创新精神，丰富的实践经验以及广阔的胸襟都深深的影响着我，使我受益匪浅。在此向导师致以最诚挚的感谢和最衷心的祝愿。

此外，我的同事和朋友等都曾对作者给予过真诚的帮助，在此也深表感谢。

本文引用了大量的资料和参考文献，在此向其作者表示谢意。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。我愿在以后的学习和研究过程中，得到导师张国栋教授的更多的指导，以更加丰厚的成果来答谢曾经关心、帮助和支持过我的导师、领导、家人、同事和朋友。

浅埋暗挖施工图片



附图1 古运河暗挖段大管棚超前支护



附图2 古运河暗挖段中导洞①部土体开挖



附图3 古运河暗挖段中导洞②部土体开挖



附图4 古运河暗挖段中导洞③部土体开挖



附图5 古运河暗挖段中墙底板混凝土浇筑



附图6 古运河暗挖段中导洞一衬拆除、浇筑中墙



附图7 古运河暗挖段中墙蘑菇顶施工缝及钢筋接头分布



附图8 古运河暗挖段中墙底板混凝土分块浇筑情况



附图9 古运河暗挖段中洞二衬混凝土结构浇筑完成、开挖边洞



附图10 古运河暗挖段拱涵结构全部贯通



附图11 古运河暗挖段中央隔离带及高速路面沉降情况



附图12 古运河暗挖段高速南侧大管棚出露图