

GANJIN HUNNINGTU JIEGOU MOXING  
SHIYAN YU YOUHUA SHEJI

# 钢筋混凝土结构模型 试验与优化设计

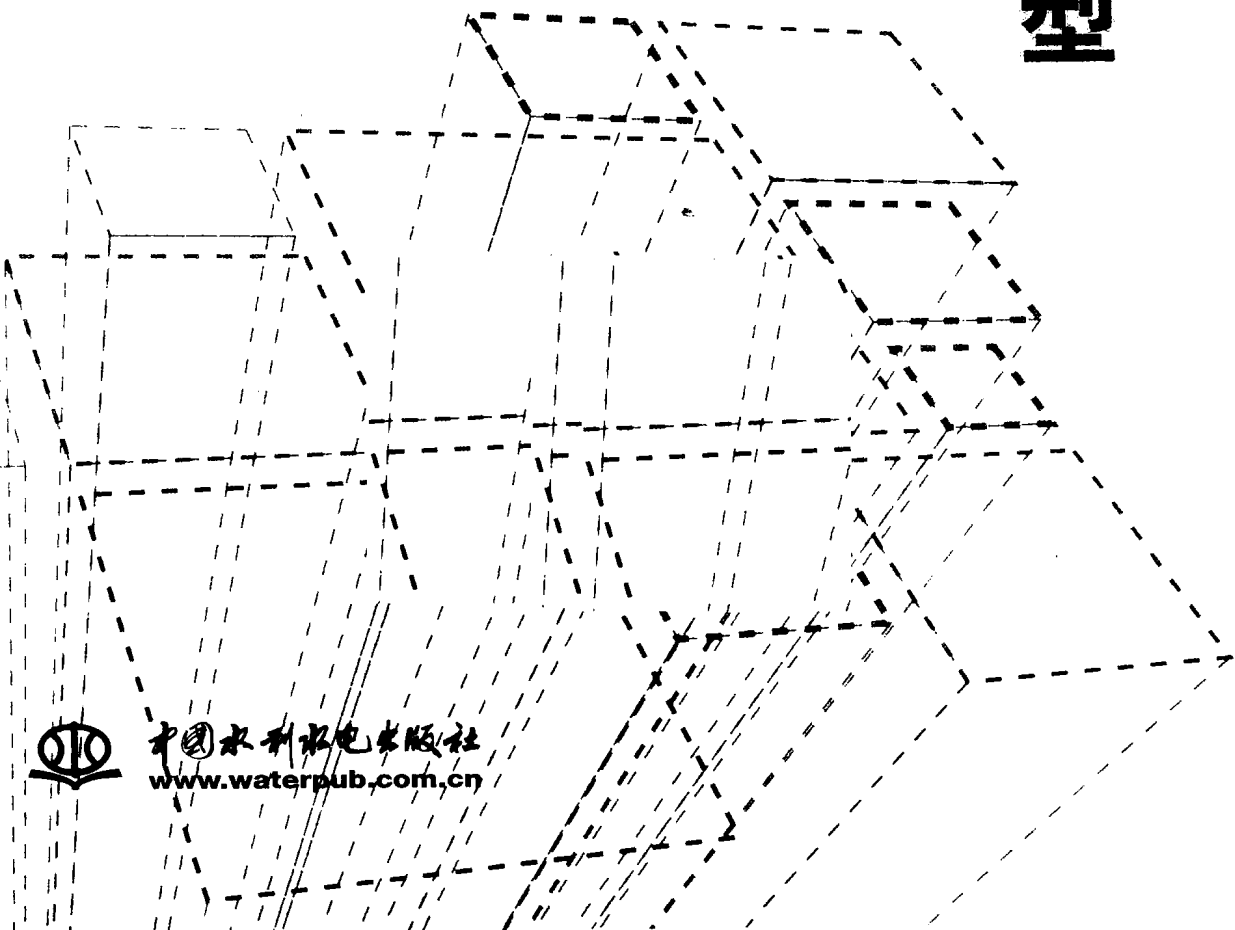
赵顺波 管俊峰 李晓克 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 钢筋混凝土结构模型 试验与优化设计

赵顺波 管俊峰 李晓克 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 前 言

## PREFACE

随着国家基础设施建设的迅速发展,土木水利工程各领域探索并应用大型复杂混凝土结构的需求日益增加。为保证所建混凝土工程的可靠性、适用性及经济性,在结构工程研究领域,钢筋混凝土结构仿真模型试验技术得到了广泛应用。本书著者在河南省杰出青年科学基金(04120002300)和河南省高校创新人才培养工程培养对象基金(豫教高[2004]294号)等科研经费资助下,结合南水北调中线工程钢筋混凝土多纵梁渡槽结构仿真模型试验研究,开展了钢筋混凝土结构仿真模型试验理论、关键技术及结构优化设计方法研究,现将主要成果分6章结集出版。

第1章介绍了结构仿真模型试验的基本概念及作用,概括了混凝土结构仿真模型试验方法的国内外研究现状,从相似的基本概念、相似原理与量纲分析、结构静力相似模型设计和钢筋混凝土结构仿真模型的相似要求等方面阐述了混凝土结构仿真模型试验的基本理论。

第2章根据钢筋混凝土梁裂缝的产生机理、延伸发展特征和宽度变化规律,阐述和进一步明确了钢筋混凝土梁的裂缝分类统计分析原则。通过对各类型裂缝的数量、平均间距、平均宽度及最大宽度分布规律的分类统计分析,确定了结构设计中裂缝宽度验算对应的裂缝形态特征及其内涵。通过比较分析现行规范的裂缝宽度验算公式,结合试验研究成果,提出了以纵向受拉钢筋直径和间距为变量的有效受拉截面高度计算方法,建立了考虑截面高度与有效配筋指数耦合影响的平均裂缝间距计算公式,提出了受拉区范围内不同高度处裂缝宽度和主裂缝间距稳定时的裂缝延伸高度的计算方法,形成了完整的裂缝宽度计算体系。

第3章引入结构仿真模型试验相似理论,提出了考虑截面高度、混凝土保护层厚度与配筋率等参数的钢筋混凝土受弯构件正截面抵抗矩塑性系数计算公式和抗裂弯矩相似比计算方法,建立了钢筋混凝土受弯构件平均裂缝间距

与最大裂缝宽度的相似比计算公式，为钢筋混凝土结构模型试验结果反演到结构原型提供了理论依据和计算方法。

第4章依托南水北调工程总干渠初设阶段进行的双洎河钢筋混凝土多纵梁渡槽结构设计及其仿真模型试验研究，介绍了钢筋混凝土结构仿真模型的设计与制作、试验加载与测试方案、模型试验关键技术的研发以及主要测试成果。

第5章对比分析了钢筋混凝土多纵梁渡槽原型及其仿真试验模型的受力性能，研究了以面力模拟渡槽自重、以等效集中荷载或阶梯形均布荷载模拟渡槽横向水荷载对渡槽结构变形和混凝土应力的影响规律，对模型试验加载方法的合理性进行了评价。通过钢筋混凝土多纵梁渡槽仿真模型与原型在弹性和弹塑性阶段的相似比，将模型受力性能实测结果反演为原型受力状态，并与原型三维有限元计算结果进行对比，验证了渡槽模型试验合理性，表明反演计算成果可用于正确评价渡槽原型的正常使用状态的受力性能。

第6章提出了裂缝截面混凝土名义拉应力与最大裂缝宽度的理论关系公式。根据试验资料的数理统计与可靠性分析，提出了名义拉应力的简化计算公式和实用公式，为钢筋混凝土结构设计快速选取截面尺寸提供了依据，便于大型与复杂结构优化设计对结构正常使用裂缝宽度的控制。采用三维实体有限元参数化模型，以截面抗裂控制侧墙和底板的应力值，以结构变形协调调整各纵横梁的间距大小，由名义拉应力法约束各纵横梁跨中底部应力值，以结构自重最轻为目标函数对渡槽进行寻优分析，得到了最优的渡槽主要受力构件的截面尺寸和布置。采用三维梁壳有限元模型计算出优化渡槽各构件内力值并对其进行配筋。与原设计方案比较，优化后的渡槽结构自重轻、刚度分布合理、变形协调一致且配筋经济。

本书著作者为华北水利水电学院赵顺波教授、管俊峰博士和李晓克副教授。参加本书所述钢筋混凝土多纵梁渡槽试验研究工作的还有华北水利水电学院王克修教授、李树瑶教授、胡志远高级工程师、赵平副教授、陈文义副教授、赵瑜教授、邱林教授、李凤兰教授以及河南省水利水电设计研究有限公司的姚振琴、唐献富、冯光伟等同志。大连理工大学博士研究生导师黄承逵教授对本课题研究给予了具体指导。硕士研究生张利梅、张学朋、程晓天参加了相关试验测试工作，在此一并表示衷心感谢。

由于著作者水平所限，书中不当之处，敬请读者批评指正。

著作者

2011年7月于郑州



# PREFACE

## 前 言

Along with the rapid development of national infrastructure construction, the requirements are increasing to explore and apply large and complex reinforced concrete structures in various fields of civil and hydraulic engineering. To ensure the reliability serviceability and economical efficiency of built concrete structures, the similitude model tests of reinforced concrete structures have been widely applied. By the supports of Henan Provincial Science Fund for Outstanding Youth (No. 04120002300) and Innovation Talents Cultivating Engineering in Universities of Henan Province (Yu Education [2004] 294), and combined with the structural similitude model test of reinforced concrete aqueduct with multi-longitudinal beams for the Middle-line of South-to-North Water Transfer Project, authors of this book conducted the study on similitude model test theory, key technology and optimization design method of reinforced concrete structures. Now, the main results are collected in this book to be published.

Chapter 1 explains the basic concept and function of structural similitude model test, introduces the domestic and overseas state of art of test methods for similitude model of concrete structures, and states the basics of similitude model test of concrete structures in aspects of basic concepts of similitude, principle of similitude, dimensional analysis, model design of statistic similitude structure and similitude requirements of reinforced concrete structural model.

Chapter 2 states and clearly defines the principle of classified statistical analysis for cracks of reinforced concrete beams according to their genetic mechanisms, extension characteristics and variations, and determines the form characteristics and connotation of crack checked in structural design on the basis of classified statistical analysis for cracks in aspects of distribution numbers, mean space, mean width and maximum width. Comparing the formulas specified in current design codes and combining the experimental results, it suggests the method for calculating effective tensile depth of cracked section considering the parameters of reinforcement diameter and space, and gives the formulas for mean crack space affected by coupling of sectional depth and ef-

fective reinforcement index, for crack width at any position within tensile zone of side surface, and for crack extension length corresponding to stable space of main cracks. These works form the integrated calculation system of crack width.

Chapter 3 builds the method for calculating similitude ratio of sectional cracking moment of reinforced concrete beams and the formula for calculating plasticity coefficient of section modulus considering such factors as sectional depth, concrete cover and reinforcement ratio. It also proposes the formula for calculating similitude ratios of mean crack space and maximum crack width of reinforced concrete beams. The works provide the theoretical basis and computation method for back-analysis of the model test results of reinforced concrete structures.

Chapter 4 introduces the design and fabrication of similitude model, test upload and measure program, key technological researches and main test results depending on the structural design and similitude model test studies of reinforced concrete aqueduct with multi-longitudinal beams for South-to-North Water Transfer Project.

Chapter 5 comparatively analyzes the mechanical behaviors of proto and model of reinforced concrete aqueduct with multi-longitudinal beams, and evaluates the rationality of upload method of model test according to the effects of self-weight of aqueduct simulated by surface load, transverse water pressure simulated by equivalent concentrated load or trapezoid distribution load on the deformation and concrete stress of aqueduct. Depending on the similarity ratios of similitude model to proto in elastic and elastoplastic stages, it back-analyzes the loading behaviors of similitude model to the proto of the reinforced concrete aqueduct with multi-longitudinal beams, and checks the reasonability of model test by comparing the back-analyses results with the FEM results of proto aqueduct. These works prove that the back-analyzed results can properly express the normal service state of proto aqueduct.

Chapter 6 deduces the theoretical formula relating the nominal tensile stress to the maximum crack width, and proposes the simplified practical formulas for the nominal tensile stress by statistical and reliability analysis of test data, which provides the routes for rapidly selecting dimension and conveniently controlling crack width of large and complex reinforced concrete structures. By means of 3D finite element parameterized model, it brings out the optimal sectional dimensions and arrangement of main loading members of aqueduct aiming at minimum self-weight by the optimization scheme, in which the stresses of sidewall and floor are controlled by the sectional crack-resisting, the distances of horizontal and longitudinal beams are adjusted by the coordination of structural deformation and the stresses at mid-span bottom of horizontal and longitudinal beams are restrained by the nominal tensile stress. Meanwhile, it ar-

ranges the reinforcements of the optimized aqueduct according to the internal force by 3D beam-shell finite element numerical model. These works show that the optimal aqueduct has advantages of light weight, reasonable stiffness distribution, coordinated deformation and economical reinforcements comparing with the design of proto one.

The authors of this book are Prof. Shunbo ZHAO, Dr Junfeng GUAN and A/Prof. Xiaoke LI at North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, China. They would like to say thanks for participating in aqueduct simulation model test to Prof. Kexiu WANG, Prof. Shuyao LI, Senior Engineer Zhiyuan HU, A/Prof. Ping ZHAO, A/Prof. Wenyi CHEN, Prof. Yu ZHAO, Prof. Lin QIU and Prof. Fenglan LI at North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou, China; and Ms. Zhenqin YAO, Mr. Xianfu TANG and Mr. Guangwei FENG at Henan Provincial Design and Research Limited Company of Water Conservancy and Hydroelectric Power, China. They also express sincerely thanks to Prof. Chengkui HUANG at Dalian University of Technology for his kindly advices, and to Master postgraduates Limei ZHANG, Xuepeng ZHANG and Xiaotian CHENG for their participating in relational tests. Thanks very much.

The authors would like to thank all of the readers for pointing out mistakes of this book.

Shunbo ZHAO, Junfeng GUAN and Xiaoke LI

July, 2011 in Zhengzhou

# 目 录

## 前言

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 结构仿真模型试验的基本概念及作用 .....	2
1.3 混凝土结构仿真模型试验方法的国内外研究现状 .....	2
1.3.1 混凝土结构仿真模型国内研究现状 .....	2
1.3.2 混凝土结构仿真模型国外研究现状 .....	8
1.4 混凝土结构仿真模型试验的理论基础 .....	9
1.4.1 相似的基本概念 .....	9
1.4.2 相似原理与量纲分析 .....	11
1.4.3 结构静力相似模型设计 .....	13
1.4.4 钢筋混凝土结构仿真模型的相似要求 .....	16
参考文献 .....	17
<b>第2章 钢筋混凝土梁裂缝宽度计算方法</b> .....	21
2.1 概述 .....	21
2.2 试验研究成果 .....	22
2.2.1 试验构件参数设计 .....	22
2.2.2 试验测试内容及加载装置 .....	24
2.2.3 实测抗裂度及裂缝分布 .....	25
2.3 钢筋混凝土梁裂缝分类统计分析 .....	28
2.3.1 各类型裂缝的定义 .....	28
2.3.2 裂缝分类统计分析 .....	28
2.3.3 裂缝截面有效受拉高度的确定 .....	29
2.3.4 平均裂缝间距的统计分析 .....	32
2.3.5 裂缝宽度的统计分析 .....	33
2.3.6 裂缝宽度扩大系数的统计分析 .....	35
2.4 钢筋混凝土梁裂缝宽度计算方法 .....	36
2.4.1 现行规范钢筋混凝土梁裂缝宽度验算公式的对比分析 .....	36
2.4.2 钢筋混凝土梁纵向受拉钢筋的水平位置裂缝宽度计算方法 .....	45
2.4.3 保护层厚度不同时钢筋混凝土梁的任意位置裂缝宽度计算方法 .....	49



2.4.4	配筋不同时钢筋混凝土梁的任意位置裂缝宽度计算方法	58
2.4.5	高截面钢筋混凝土梁的任意位置裂缝宽度计算方法	63
2.5	钢筋混凝土梁裂缝延伸高度计算方法	69
2.5.1	裂缝延伸高度特征	69
2.5.2	裂缝延伸机理分析	70
2.5.3	裂缝延伸高度的理论计算与试验验证	71
2.5.4	工程检测应用	77
2.6	本章小结	78
	附录 钢筋重心水平处的裂缝宽度实测值	79
	参考文献	89
<b>第3章</b>	<b>钢筋混凝土梁抗裂度及裂缝宽度相似理论</b>	<b>93</b>
3.1	概述	93
3.2	钢筋混凝土梁抗裂度相似性与计算方法	93
3.2.1	理论分析	93
3.2.2	截面抵抗矩塑性系数	94
3.2.3	抗裂性相似仿真模型试验成果分析	100
3.3	钢筋混凝土梁裂缝分布和宽度相似性与计算方法	101
3.3.1	钢筋混凝土梁裂缝分布的相似性与计算方法	102
3.3.2	钢筋混凝土梁裂缝宽度的相似性与计算方法	103
3.4	本章小结	104
	参考文献	105
<b>第4章</b>	<b>钢筋混凝土多纵梁渡槽结构仿真模型设计与试验研究</b>	<b>107</b>
4.1	概述	107
4.2	钢筋混凝土多纵梁渡槽结构原型简介	107
4.2.1	原型结构设计基本资料	107
4.2.2	原型结构主要技术参数	108
4.2.3	原型结构内力计算方法	109
4.2.4	渡槽结构整体有限元分析	122
4.2.5	渡槽结构配筋计算	122
4.3	钢筋混凝土多纵梁渡槽仿真模型设计与试验	124
4.3.1	仿真模型设计与制作	124
4.3.2	仿真模型试验加载方法	126
4.3.3	仿真模型试验测试系统	129
4.3.4	仿真模型试验加载程序与超载方法	132
4.4	钢筋混凝土多纵梁渡槽仿真模型试验成果	133
4.4.1	结构弹性受力阶段试验与计算成果对比	133
4.4.2	模型渡槽裂缝分布形态和破坏特征	135

4.4.3	模型侧墙的受力性能	139
4.4.4	模型纵梁的受力性能	140
4.4.5	模型横梁的受力性能	144
4.4.6	支座反力	145
4.5	本章小结	146
	参考文献	147
<b>第5章</b>	<b>钢筋混凝土多纵梁渡槽结构仿真模型试验反演分析</b>	<b>149</b>
5.1	概述	149
5.2	钢筋混凝土多纵梁渡槽仿真模型试验加载方法分析评价	149
5.2.1	渡槽结构弹性相似比计算方法	149
5.2.2	钢筋混凝土多纵梁渡槽有限元计算模型	150
5.2.3	原型与模型有限元对比分析	150
5.3	钢筋混凝土多纵梁渡槽仿真模型试验成果反演分析	155
5.3.1	渡槽原型非线性有限元计算模型	156
5.3.2	渡槽原型反演计算方法	156
5.3.3	渡槽原型开裂荷载反演分析	157
5.3.4	渡槽原型应力反演分析	158
5.3.5	渡槽原型变形反演分析	159
5.3.6	渡槽原型支座反力反演分析	160
5.3.7	渡槽原型裂缝分布形态反演与裂缝宽度预测	160
5.4	本章小结	161
	参考文献	162
<b>第6章</b>	<b>钢筋混凝土多纵梁渡槽结构优化设计方法研究</b>	<b>163</b>
6.1	概述	163
6.2	钢筋混凝土梁裂缝宽度的名义拉应力控制法	163
6.2.1	基于半理论半经验裂缝宽度公式的名义拉应力	163
6.2.2	基于数理统计裂缝宽度公式的名义拉应力	165
6.2.3	名义拉应力与最大裂缝宽度关系的简化公式	165
6.2.4	名义拉应力的实用公式	166
6.2.5	名义拉应力公式的应用	167
6.3	三维梁壳单元渡槽内力计算模型	167
6.3.1	三维梁壳单元模型	168
6.3.2	三维梁壳单元计算精度验证	168
6.4	钢筋混凝土多纵梁渡槽优化设计方法	169
6.4.1	优化设计原则	169
6.4.2	多纵梁渡槽结构优化设计的数学模型	171
6.4.3	优化过程及结果	172

6.4.4 基于三维梁壳单元内力计算值的配筋 .....	172
6.4.5 多纵梁渡槽优化设计与原设计的比较 .....	172
6.5 本章小结 .....	175
参考文献 .....	176

# CONTENTS

## PREFACE

<b>CHAPTER 1 INTRODUCTION</b> .....	1
1.1 Introduction .....	1
1.2 Basic Concept and Function of Structural Similitude Model Test .....	2
1.3 Domestic and Overseas State of Art about Concrete Structural Similitude Model Test Method .....	2
1.3.1 Domestic State of Art .....	2
1.3.2 Overseas State of Art .....	8
1.4 Theoretical Basis of Concrete Structural Similitude Model Test .....	9
1.4.1 Basic Concept of Similitude .....	9
1.4.2 Principle of Similitude and Dimensional Analysis .....	11
1.4.3 Model Design for Structural Static Similitude .....	13
1.4.4 Similitude Requirements of Similitude Model of Reinforced Concrete Structures .....	16
Reference .....	17
<b>CHAPTER 2 METHOD FOR CRACK WIDTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS</b> .....	21
2.1 Introduction .....	21
2.2 Experimental Results .....	22
2.2.1 Design of Test Beams .....	22
2.2.2 Test Contents and Loading Device .....	24
2.2.3 Measured Cracking Strength and Crack Distribution .....	25
2.3 Classified Statistical Analysis for Cracks of Reinforced Concrete Beams .....	28
2.3.1 Definition of Crack Types .....	28
2.3.2 Classified Statistical Analysis of Cracks .....	28
2.3.3 Determination of Effective Tensile Depth of Cracked Section .....	29
2.3.4 Statistical Analysis of Mean Crack Space .....	32
2.3.5 Statistical Analysis of Crack Width .....	33
2.3.6 Statistical Analysis of Enlarging Coefficient of Crack Width .....	35
2.4 Method for Crack Width of Reinforced Concrete Beams .....	36
2.4.1 Comparison of Crack Width Formulas Specified in Current Codes .....	36

2. 4. 2	Formulas of Crack Width at Horizontal Position of Longitudinal Tensile Reinforcements .....	45
2. 4. 3	Formulas of Crack Width at Any Position of Reinforced Concrete Beams with Different Depth of Concrete Cover .....	49
2. 4. 4	Formulas of Crack Width at Any Position of Reinforced Concrete Beams with Different Reinforcement .....	58
2. 4. 5	Formulas of Crack Width at Any Position of Reinforced Concrete Beams with Large Depth .....	63
2. 5	Method for Crack Extension Length of Reinforced Concrete Beams .....	69
2. 5. 1	Characteristics of Crack Extension Length .....	69
2. 5. 2	Mechanisms of Crack Extension .....	70
2. 5. 3	Calculation and Experimental Checking of Crack Extension Length .....	71
2. 5. 4	Application in Engineering Detection .....	77
2. 6	Brief Summary .....	78
	Appendix Test Data of Crack Width in Horizontal Position of Reinforcement .....	79
	Reference .....	89

<b>CHAPTER 3</b>	<b>THEORY OF SIMILARITY IN CRACKING STRENGTH AND CRACK WIDTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS .....</b>	<b>93</b>
3. 1	Introduction .....	93
3. 2	Similitude and Calculation Method of Cracking Strength of Reinforced Concrete Beams .....	93
3. 2. 1	Theoretical Analysis .....	93
3. 2. 2	Plasticity Factor of Section Modulus .....	94
3. 2. 3	Analysis of Test Results of Simulation Model in Crack Strength .....	100
3. 3	Calculation Method for Similitude of Crack Distribution and Width of Reinforced Concrete Beams .....	101
3. 3. 1	Similitude and Calculation Method for Crack Distribution of Reinforced Concrete Beams .....	102
3. 3. 2	Similitude and Calculation Method for Crack Width of Reinforced Concrete Beams .....	103
3. 4	Brief Summary .....	104
	Reference .....	105

<b>CHAPTER 4</b>	<b>SIMILITUDE MODEL DESIGN AND TEST OF REINFORCED CONCRETE AQUEDUCT WITH MULTI-LONGITUDINAL BEAMS .....</b>	<b>107</b>
4. 1	Introduction .....	107
4. 2	Biography of Proto Structure of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	107
4. 2. 1	Design Basics of Proto Structure .....	107

4. 2. 2	Main Technical Parameters of Proto Structure .....	108
4. 2. 3	Calculation Method for Internal Forces of Proto Structure .....	109
4. 2. 4	Finite Element Analysis of Aqueduct Structure .....	122
4. 2. 5	Reinforcement of Aqueduct .....	122
4. 3	Similitude Model Design and Test of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	124
4. 3. 1	Design and Manufacture of Similitude Model .....	124
4. 3. 2	Test Loading Methods of Similitude Model .....	126
4. 3. 3	Test System of Similitude Model .....	129
4. 3. 4	Test Upload Procedure and Over-loading Method .....	132
4. 4	Test Results of Similitude Model of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	133
4. 4. 1	Comparison of Test and Calculation Results in Elastic Stage of Structure .....	133
4. 4. 2	Crack distribution and Failure Characteristics of Aqueduct Model .....	135
4. 4. 3	Mechanical Properties of Side Walls .....	139
4. 4. 4	Mechanical Properties of Longitudinal Beams .....	140
4. 4. 5	Mechanical Properties of Transverse Beams .....	144
4. 4. 6	Inverse Force of Supports .....	145
4. 5	Brief Summary .....	146
	Reference .....	147

**CHAPTER 5 BACK-ANALYSIS OF SIMILITUDE MODEL TEST OF REINFORCED  
CONCRETE AQUEDUCT WITH MULTI-LONGITUDINAL BEAMS ... 149**

5. 1	Introduction .....	149
5. 2	Evaluation for Loading Method of Similitude Model Test of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	149
5. 2. 1	Calculation Method for Elastic Similitude Ratio of Aqueduct .....	149
5. 2. 2	FEM Models of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	150
5. 2. 3	Comparison of FEM Analysis of Proto and Model .....	150
5. 3	Back-analysis of Similitude Model Test Results of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	155
5. 3. 1	Nonlinear FEM Model of Proto Aqueduct .....	156
5. 3. 2	Back-analysis Method for Proto Aqueduct .....	156
5. 3. 3	Back-analysis of Cracking Load of Proto Aqueduct .....	157
5. 3. 4	Back-analysis of Stress of Proto Aqueduct .....	158
5. 3. 5	Back-analysis of Deformation of Proto Aqueduct .....	159
5. 3. 6	Back-analysis of Support Inverse Force of Proto Aqueduct .....	160
5. 3. 7	Crack Distribution Back-analysis and Crack Width Forcast of Proto Aqueduct .....	160

5.4	Brief Summary .....	161
	Reference .....	162
<b>CHAPTER 6 OPTIMAL DESIGN METHOD OF REINFORCED CONCRETE</b>		
	<b>AQUEDUCT WITH MULTI-LONGITUDINAL BEAMS .....</b>	<b>163</b>
6.1	Introduction .....	163
6.2	Nominal Tensile Stress Based on Theoretical-Practical Formula of Crack Width .....	163
6.2.1	Nominal Tensile Stress Based on Theoretical-Practical Formula of Crack Width .....	163
6.2.2	Nominal Tensile Stress Based on Mathematical Statistical Formula of Crack Width .....	165
6.2.3	Simplified Formula Relating Nominal Tensile Stress to Maximum Crack Width .....	165
6.2.4	Practical Formula of Nominal Tensile Stress .....	166
6.2.5	Application of Nominal Tensile Stress Formula .....	167
6.3	3D Beam-Shell Element Model for Calculating Internal Force of Aqueduct .....	167
6.3.1	3D Beam-Shell Element Model .....	168
6.3.2	Checking on Computational Accuracy of 3D Beam-Shell Element .....	168
6.4	Optimal Design of Reinforced Concrete Aqueduct with Multi-longitudinal Beams .....	169
6.4.1	Principle of Optimal Design .....	169
6.4.2	Numerical Model for Optimal Design of Aqueduct .....	171
6.4.3	Optimal Procedure and Results .....	172
6.4.4	Reinforcements Based on Internal Forces of 3D Beam-Shell Element .....	172
6.4.5	Comparison of Optima Design with Proto Design .....	172
6.5	Brief Summary .....	175
	Reference .....	176

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

结构仿真模型试验是一项古老而又新颖的研究课题<sup>[1-6]</sup>。在混凝土结构学科研究中具有不可替代的作用，也一直是解决工程复杂问题的重要手段<sup>[7-12]</sup>。尽管模型试验的一些功能逐步被飞速发展的计算机技术所取代，但越来越多新的研究领域仍需要其发挥作用，所以混凝土结构仿真模型试验不仅具有重要的工程实用价值，而且具有广阔的发展前景<sup>[13-15]</sup>。发展和完善混凝土仿真模型的设计理论，探寻科学合理的混凝土仿真模型试验技术仍然是一项重要的基础性研究工作。

在钢筋混凝土结构仿真模型试验设计理论中，模型与原型弹性相似比已得到了充分研究，众多学者通过理论分析结合试验验证给出了明确的结论<sup>[16-20]</sup>。而通过仿真模型试验结果反演分析原型结构的抗裂度、裂缝宽度、跨中挠度等弹塑性阶段的反应，还是一个亟待解决的关键问题<sup>[21-23]</sup>。当结构材料的受力发展到弹塑性阶段以后，模型与原型的结构受力性能就不能够再按照几何相似比加以推证，因此，为了仿真模型实测结果科学合理地反演原型弹塑性受力性能，开展钢筋混凝土构件或结构弹塑性阶段的试验研究，正确认识和把握模型与原型在开裂荷载、裂缝分布及宽度、开裂后非线性变形等弹塑性方面的相似规律并寻求换算关系，对于丰富与发展钢筋混凝土仿真模型设计理论具有重要意义。

结构仿真模型试验与计算分析存在相互验证的关系。一些情况下，对结构的数学模型进行计算分析比作结构仿真模型试验更节省时间及经费，但结构仿真模型试验因不受简化假定的影响，考虑的影响因素更多，更能准确反映原型结构的各种物理现象及规律。同时，由于试验技术受人为主观因素的影响较大，采用计算分析作为试验结果的校核手段也是必不可少的。

仿真模型试验设计是保障试验精确、可靠的基础工作。合理高效的试验技术是仿真模型试验成功的必要条件。随着科技的飞速进步，仿真模型试验技术也发展迅速，国内外的专家学者们不断改进现有加载方法，研制新的加载设备，提高模型模拟的精确性，完善和丰富着仿真模型的试验手段。但限于各种客观因素，模型的加载条件和方式等并不能和原型完全一致，对加载方式的合理性进行分析评价也是确定能否由仿真模型试验的实测成果通过相似关系反演到原型的重要工作内容。

在仿真模型试验基础上对原型结构受力性能进行确切认知以后，进一步开展优化结构设计可以改善原型结构的受力性能。因此，研究恰当的钢筋混凝土结构优化设计方法，对最终设计达到安全、适用、经济的目标也是必要的技术工作。





## 1.2 结构仿真模型试验的基本概念及作用

一般情况下,钢筋混凝土结构的仿真模型需要采用与原型结构具有相同本构关系的材料制作而成,模型的几何形状和尺寸、边界条件和外部作用等均必须与原型结构遵循一定的相似定律。结构仿真模型试验的目的就是将作用在结构原型上的力学现象缩小到模型上,从模型模拟的与原型相似的物理现象中量测所需的各项性能,再通过一定的相似关系反推到原型<sup>[7-12,16,17,20]</sup>。

在实际工程设计中,结构仿真模型试验的意义与作用主要表现在以下几方面<sup>[7-12,16-20,22,23]</sup>:

(1) 仿真模型试验对于新型结构性能的研究、新型结构设计理论的验证及推动新计算理论的发展具有一定的科研意义。采用新型结构形式或材料,或者应用新的结构设计理论、优化方案及新的施工方法时,需进行结构仿真模型试验来验证原型结构的工作性能,校核设计理论和施工方法的合理性及适用性,充分认识原型结构的受力特性及作用规律,确保原型结构的安全性、稳定性和可靠性。

(2) 仿真模型试验比原型试验所需费用及工作量减少很多,具有经济性好,针对性强,数据准确的特点。事实上,有些结构是根本不可能实现原型试验的。由于按相似比设计,仿真模型的截面尺寸一般比原型结构小几倍至几百倍,其材料用量及所受荷载也成比例减小,因此模型试验一般可在试验条件较好的室内进行,可严格控制主要设计参数,避免外界因素的干扰。另外,仿真模型上易作改变设计参数的多个模型对比试验,达到不同的试验目的。

(3) 仿真模型试验能够模拟现有计算方法所不能计算或不能准确计算的许多复杂结构的受力特性。如受力复杂的异型钢筋混凝土及预应力钢筋混凝土结构、考虑土体与结构相互作用的地下工程结构以及三维非连续介质、非线性、各向异性、复杂边界条件等的结构分析问题。相应的,仿真模型试验却能形象且直观地展示整个模型从受载直至破坏的全过程。仿真模型试验对于研究结构在弹塑性阶段的各种力学行为,特别是研究结构的破坏部位、破坏形式和破坏发展过程,确定结构的极限承载能力和超载安全系数等方面具有重要功能。

(4) 对于关系国计民生的重大新型结构,如长江三峡工程、黄河小浪底工程及南水北调工程中的重大建筑物等,通过结构仿真模型试验,可以全面把握其使用性能和安全可靠性能,为建造决策提供科学依据和有力支撑。

## 1.3 混凝土结构仿真模型试验方法的国内外研究现状

### 1.3.1 混凝土结构仿真模型国内研究现状

近年来,我国多家科研单位和高校进行了钢筋混凝土结构仿真模型试验,使得一些试验方法的应用和加载装置的研制达到了相当高的技术水平。

陈瑜等人详细总结了大比尺结构仿真模型试验的加载装置设计方法<sup>[24]</sup>。图 1.1 为板