

学校编码: 10384
学号: 200435013

分类号___密级___
UDC___

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

钢筋混凝土框架边梁协调扭转性能的研究

Compatibility Torsion Study of Reinforced Concrete
Spandrel Beam

李悦军

指导教师姓名: 李少泉 教授

专 业 名 称: 结构工程

论文提交日期: 2007 年 5 月

论文答辩时间: 2007 年 6 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2007 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

2007 年 月 日

摘 要

在混凝土框架中，边梁因变形协调而发生协调扭转，其弹性协调扭矩值主要取决于边梁扭转线刚度与楼面梁弯曲线刚度之间的比值；混凝土开裂后，由于钢筋混凝土结构的非线性性能，以及构件开裂后其扭转刚度与弯曲刚度退化速率的不同，边梁的弹塑性协调扭矩值难以准确计算。为了便于指导工程设计，我国混凝土结构设计规范^[1]明文规定：“对属于协调扭转的钢筋混凝土构件，受相邻构件约束的支承梁的扭矩宜考虑内力重分布。”并在条文说明中给出了弹性协调扭矩的最大调幅系数可取 0.4。然而在工程实际中，按上述方法设计仍然常常出现抗扭钢筋超筋。

为了解决这一问题，本文在对模型的试验结果进行收集、整理及统计分析的基础上，采用非线性有限元程序（混凝土模式），对钢筋混凝土梁纯扭转及协调扭转进行了有针对性的仿真试验。研究表明，钢筋混凝土梁的扭转裂缝宽度与扭转角相关，控制扭转角可以间接起到控制扭转裂缝宽度的作用，因此钢筋混凝土梁协调扭转设计的关键是控制扭转角；而主梁在正常使用荷载下的扭转角与设计方法几乎无关，即不同的设计方法对控制协调扭转角的作用不大；协调扭转裂缝宽度可通过控制主梁在正常使用荷载下的扭转角，以及主梁抗扭钢筋的构造措施来实现。

在收集、整理及统计已有模型试验数据并结合大量仿真分析的基础上，明确了扭转角与最大扭转裂缝宽度大体上呈线性关系，分析表明，最大扭转裂缝宽度还与抗扭钢筋配筋率有关，给出了最大裂缝宽度的回归统计式，并讨论了正常使用状态下钢筋混凝土梁扭转角的控制值。

对钢筋混凝土梁协调扭转模型的仿真分析表明，主梁在使用荷载下的单位长度扭转角 θ_K 与扭裂比、主次梁跨长比以及截面尺寸有关，与混凝土强度等级无关。在大量仿真分析的基础上，给出了主梁在使用荷载下单位长度扭转角 θ_K 的回归统计式。

对协调扭转模型在不同设计方法下的经济对比分析表明，抗弯钢筋的效能远大于抗扭钢筋。协调扭转梁应在满足变形、裂缝宽度及延性的基础上尽可能少配抗扭钢筋，并且当抗扭钢筋得以充分利用时，可获得较好的经济效果。

基于上述研究成果,给出了正常使用状态下钢筋混凝土梁协调扭转角的计算方法,协调扭转角的控制值,协调扭转梁的分析与设计方法,以及相应的构造措施。

关键词: 协调扭转; 单位扭转角; 扭裂比; 协调扭转设计方法

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Spandrel beam appears compatibility torsion because of compatibility deformation in reinforced concrete frame, its elastic torque lies on the ratio of spandrel beam torsional stiffness and floor beam bending stiffness. After concrete beam cracks, spandrel beam plastic torque is hard to be calculated because of the nonlinear character of reinforced concrete structure and the difference of degraded ratio of torsional stiffness and bending stiffness. In order to direct practice engineering our nation concrete code for structure design specified that the torque of restricted spandrel beam should be considered its inner force redistributed. The code points out that the maximal adjustment coefficient of elastic compatibility torsion moment is 0.4. But it always overreinforced according to the design method in practice engineering.

In order to settle this question, pure torsion and compatibility torsion emulate test of reinforced concrete beam have been done with nonlinear finite element code (concrete mode) based on the analysis of model test. The research indicates that the crack width of concrete beam is related to its twist angle, the crack width can be controlled by limit the twist angle of the concrete beam, so the design key of compatibility torsion of reinforced concrete is to control the twist angle. The twist angle of spar boom under working load is independent of design method. There is tiny difference between kinds of design method on torsion crack control. Compatibility torsion crack width of the spar boom should be controlled by limiting its twist angle under working load and constitution measure.

The linear relation of twist angle and the maximal crack width is found base on the analysis of model test and emulation analysis, the maximal crack width is related to ratio of torsion reinforcement, statistic formula is given. The twist angle controlling value of reinforced concrete beam is discussed under regular service state.

The twist angle of spar boom under regular service state is related to the designing load of the compatibility torsion specimen, grade of concrete intensity, the

span length rate of spar boom and junior beam and the sectional dimension, the twist angle of spar boom is independent of concrete strength gradation. The statistic formula of unit length twist angle of spar boom under regular service state is provided.

The effectiveness of bending resistance reinforce is better than torsion resistance reinforce. Torsion resistance reinforcement should be used as little as possible on satisfy deformation, crack width, ductility requirements. Better economical effectiveness can be gained when torsion resistance reinforcement is used adequately.

The calculation formula of unit length twist angle of spar boom under regular service state, the twist angle control value, the design and analysis method of compatibility torsion beam and corresponding constitution measure are provided.

Key Words: Compatibility Torsion; Unit Length Twist Angle; Rate of Elastic Torque and Dehiscence Torque; Design Method of Compatibility Torsion

目录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 边梁协调扭转研究现状	1
1.2.1 国外的研究现状	1
1.2.2 国外的应用现状	4
1.2.3 我国研究与应用现状	6
1.3 本文的研究内容	6
1.4 本文的研究方法	7
第二章 模型试验分析研究	10
2.1 模型试验介绍	10
2.2 纯扭模型试验分析	10
2.3 协调扭转模型试验分析	11
第三章 纯扭构件有限元模拟	13
3.1 纯扭构件进行有限元模拟的目的	13
3.2 纯扭构件有限元模拟全过程分析	13
3.2.1 单元类型和实常数	13
3.2.2 材料参数	14
3.2.3 建立模型、施加荷载	17
3.2.4 求解控制	19
3.2.5 计算结果及分析	21
3.2.6 扭转变形、钢筋应力（应变）及裂缝宽度	24
第四章 协调扭转有限元模拟全过程分析	29
4.1 协调扭转模型的建立	29
4.1.1 模型的建立	29
4.1.2 仿真分析与试验结果的对比分析	30

4.2 协调扭转模型	32
4.2.1 弹性协调扭矩计算方法	32
4.2.2 第一组模型	33
4.2.3 第二组模型	36
4.2.4 第三组模型	39
4.3 协调扭转模型的对比分析	42
4.4 主梁使用荷载下单位长度扭转角的影响因素	42
4.4.1 扭裂比	42
4.4.2 扭裂比与主梁使用荷载下单位长度扭转角的关系	42
4.4.3 主梁使用荷载下单位长度扭转角的计算方法	49
4.5 最大裂缝宽度分析	51
4.6 本章小结	51
第五章 协调扭转设计建议	53
5.1 经济性分析	53
5.2 协调扭转设计建议	56
第六章 结论与展望	58
6.1 结论	58
6.2 展望	58
附录	60
Ansys 模拟混凝土扭转问题的一点建议	60
协调扭转构件主梁配筋计算	62
参考文献	64
致谢	66
攻读硕士期间发表的论文	67

Contents

Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Foreword.....	1
1.2 Research actuality of compatibility torsion spandrel beam.....	1
1.2.1 Research actuality of oversea.....	1
1.2.2 Application actuality of oversea.....	4
1.2.3 Domestic research and application actuality.....	6
1.3 Research content of this paper.....	6
1.4 Research method of this paper.....	7
Chapter 2 Analysis of model test.....	10
2.1 Intuoduction of model test.....	10
2.2 Analysis of pure torsion model test.....	10
2.3 Analysis of compatibility torsion model test.....	11
Chapter 3 Finite element simulation of pure torsion.....	13
3.1 Intention of pure torsion simulation.....	13
3.2 Process analysis of pure torsion simulation.....	13
3.2.1 Types of element and real constant.....	13
3.2.2 Parameter of material.....	14
3.2.3 Establish model and inflict load.....	17
3.2.4 Control of solving.....	19
3.2.5 Analysis of calculated result.....	21
3.2.6 Deformation of torsion、 stress(strain) of reinforce and crack width ...	24
Chapter 4 Finite element simulation of compatibility torsion....	29
4.1 Establishing of compatibility torsion model.....	29
4.1.1 Establishing of finite element model.....	29
4.1.2 Contrast of emulate test and foregone test result.....	30
4.2 Model of compatibility torsion.....	32
4.2.1 Calculating method of elastic compatibility torque.....	32
4.2.2 The first model.....	33

4.2.3	The second model	36
4.2.4	The third model	39
4.3	Contrast of three kinds of models	42
4.4	Influence factor of twist angle of spar boom under regular service state	42
4.4.1	Rate of elastic torque and dehiscence torque	42
4.4.2	Relations of rate of elastic torque and dehiscence torque and twist angle of spar boom under regular service	42
4.4.3	Calculating method of twist angle of spar boom under regular service ..	49
4.5	Analysis of the maximal crack width	51
4.6	Brief summary	52
Chapter 5	Design suggestions of compatibility torsion.....	53
5.1	Economic analysis	53
5.2	Design suggestions of compatibility torsion	56
Chapter 6	Conclusion and expectation.....	58
6.1	Conclusion.....	58
6.2	Espectation	58
Appendixs		60
Some suggestions about simulation of reinforce concrete torsion(Ansys)		60
Reinforce calculation of compatibility torsion spar boom.....		62
References		64
Acknowledgement		66
Published papers during study		67

第一章 绪论

1.1 引言

众所周知，结构构件的扭转根据扭矩形成的原因可以分为两类，即平衡扭转和协调扭转^[2]。在结构设计中，分清这两类不同性质的扭转是十分重要的。若扭转由外荷载作用产生，则其可由静力平衡条件求得，且与构件的扭转刚度无关，此类扭转称为平衡扭转。协调扭转则是由于相邻构件的弯曲转动受到支承构件扭转刚度的约束，而在支承构件中引起的扭矩，其大小由两构件相交处的变形协调条件确定。

对于平衡扭转，必须以结构的静力平衡条件求得的扭矩值作为计算依据。而对于协调扭转，当梁开裂后，框架边梁的抗扭刚度和次梁的抗弯刚度发生不同程度的退化，其中框架边梁的抗扭刚度的降低远大于次梁抗弯刚度的降低。边梁承担的协调扭矩也将大大减小。

在混凝土框架中，边梁因变形协调而发生协调扭转，其协调扭矩值主要取决于边梁扭转线刚度与楼面梁弯曲线刚度之间的比值。由于混凝土材料的非线性性质，以及钢筋混凝土构件开裂后扭转刚度、弯曲刚度退化的影响，边梁协调扭矩值难以准确计算。2002年以前的规范，主要讨论平衡扭转，教科书和学术著作对协调扭转的讨论和宣传不足。新规范给出了0.4的调幅系数；然而，在有些情况下，抗扭钢筋仍然会出现过大或超筋，实际工程中难以操作。

1.2 边梁协调扭转研究现状

1.2.1 国外的研究现状

1.2.1.1 弹性设计法

弹性设计方法假定材料和构件均为线弹性，用简化法进行计算。文献^[3]总结了弹性法的不足之处。

1. 按线弹性方法设计的边梁所受扭矩偏大，需要配置大量抗扭钢筋，从而给

设计、施工带来困难。

2. 开裂后，边梁扭转刚度大大降低，由此引起的结构弯扭内力重分布使边梁扭矩大大降低。边梁需要发生大的扭转变形才能充分发挥大量抗扭钢筋的作用，这在实际情况中往往难以实现^{[4][5]}。

3. 配置大量处于较低应力水平的抗扭钢筋影响结构的经济性。

4. 根据被高估的边梁扭矩进行设计虽能保证边梁的安全，却使受边梁约束的楼面构件（如次梁、板）的跨中正弯矩被低估。当这组内力对设计起控制作用时，结构偏于不安全。

5. Thomas T. C. Hsu^[6]的研究表明：抗弯钢筋的效能比抗扭钢筋大 4~8 倍，考虑弯扭内力重分布可使设计获得较大的经济效益。

1.2.1.2 零刚度设计法

Collins 等曾进行过 6 个模拟边梁和次梁组成的试件的试验^[7]如图 1.1。

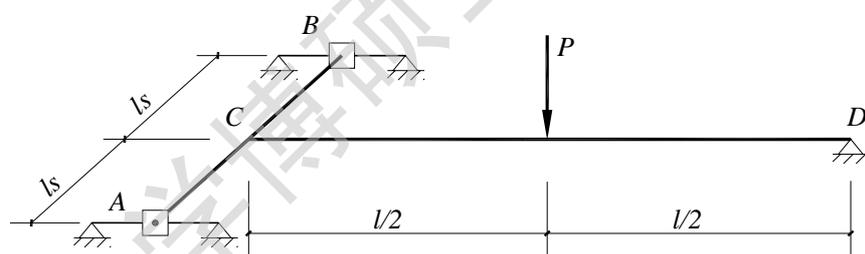


图 1.1: Collins 试件试验示意图

试验研究表明：

试件开裂引起弯扭内力重分布，用开裂后的扭转刚度分析边梁扭矩比用弹性扭转刚度分析更合理。

按零刚度设计法与弹性法设计试件，分析试验结果发现：

1. 边梁与楼面梁的挠度均明显相似。
2. 使用荷载下的裂缝类型没有显著差异，裂缝宽度也相同。但在极限荷载下，按弹性法设计的试件裂缝间距较小。
3. 最大裂缝宽度与配筋方式有关，钢筋间距小时裂缝多而窄，反之则少而宽。

4. 边梁的协调扭转设计应是控制扭转角而不是扭矩,配置抗扭构造钢筋的主要作用是分散由扭转角引起的裂缝。零刚度法设计的试件配筋较少,扭转刚度和协调扭矩小,扭转角较弹性法略小,其设计是合理的。

5. 边梁的扭转角是次梁挠度与边梁跨中挠度之差的函数。边梁跨度与次梁跨度的比值过小时,边梁的扭转角过大,裂缝宽度就会成为问题。

对于协调扭转,在承载力极限状态计算中,扭矩一般可以忽略不计,但主梁应配有抗扭所需的最小配筋率及相应的构造要求,否则易发生过早的剪扭破坏,难以保证塑性扭转角的形成。零刚度法非常简便,但对于有不同裂缝要求的结构不能灵活应用,同时由于忽略了边梁构造配筋的抗扭作用,致使楼面梁配置了多余的抗拉钢筋。

1.2.1.3 塑性设计法(极限设计法)

塑性设计法考虑结构的非弹性性质,按考虑初裂后刚度降低产生内力重分布影响的扭矩值进行设计^{[8][9]}。Mansur、Hsu等做了许多试验^{[10][11][12]},采用六种设计方法,主梁设计扭矩分别采用:

$$T_1 = \text{按弹性刚度分析求得}, T_2 = 0.50\sqrt{f_c'} \frac{b^2 h}{3},$$

$$T_3 = 0.44\sqrt{f_c'} \frac{b^2 h}{3}, T_4 = (0.33 - 0.37)\sqrt{f_c'} \frac{b^2 h}{3}, T_5 = 0.23\sqrt{f_c'} \frac{b^2 h}{3}, T_6 = 0 \quad (\text{即零刚度法}).$$

其中按 T_1 和 T_5 设计的试件仅考虑较小的作用剪力;按 T_2 设计的试件仅考虑较大的作用剪力;其他按 T_3 , T_4 和 T_6 设计的试件都考虑了作用剪力较小和较大两种情况。在Hsu按 T_6 设计的试件中,当边梁计算的抗剪钢筋量大于抗扭构造钢筋时,边梁仅按抗剪钢筋配置,不外加最小抗扭钢筋。当边梁计算的抗剪钢筋量小于抗扭构造钢筋时,边梁仅按最小抗扭钢筋配置。主要试验研究结论:

1. 按 T_1 设计的试件,破坏时主梁内箍筋与纵筋都没有屈服,混凝土压碎。次梁底部纵筋屈服后,主梁的扭转角急剧增加,这样大的扭转变形在使用中是不容许的。因此主梁内配过多的抗扭钢筋时没有必要的。

2. 按 T_2 , T_3 设计的试件,破坏时主梁内箍筋与纵筋仍没有屈服,说明还没有充分发挥抗扭钢筋的作用。

3. 按 T_4 设计的试件,破坏时主梁内箍筋与纵筋均已屈服,次梁跨中破坏稍后

于主梁的弯曲破坏。主梁既能达到设计强度，又具有较好的延性。

4. 按 T_5 设计的试件，主梁一开裂，承受的扭矩即刻降低，在次梁纵筋屈服前，主梁发生脆性破坏。说明主梁内抗扭钢筋不足，从延性分析，主梁的设计是不安全的。

5. 按 T_6 设计的试件，主梁发生过早的剪扭破坏，说明主梁设有抗扭钢筋不足以保证塑性扭转角的形成以及充分发挥次梁的抗弯能力。

6. 按不同扭矩设计的试件，在使用荷载下，最大裂缝宽度没有明显差异。

7. 三种设计法即 T_1 弹性法， T_6 零刚度法， T_4 塑性法配筋量的比较：零刚度法约可节约纵筋 27%，箍筋 51%；塑性设计法可节省纵筋 30%，箍筋 56%。

1.2.1.4 几种设计方法比较

Collins 等做了 6 个模拟由楼面梁和边梁组成的 T 形试件的试验，Mansur 等做了 7 个 T 形试件的试验^[10]，结果均表明了以上几种设计方法的异同：试件开裂后，主梁扭转刚度和次梁抗弯刚度的比值减小，从而引起内力重分配，用开裂刚度分析边梁扭矩比弹性刚度分析更为合理；按主梁扭转刚度为零（零刚度法）与按弹性刚度设计的试件相比：

1. 主梁与次梁的挠度均明显相似。

2. 在使用荷载下，裂缝类型没有明显差异，裂缝宽度也基本相同；在极限荷载下，按弹性刚度设计的试件的裂缝间距比较小；最大裂缝宽度与配筋方式有关，钢筋间距小则裂缝小而数量多，反之则裂缝大而数量少。

3. 弹性刚度设计出的试件配筋较多，塑性法时边梁的配筋最为经济。三种设计方法配筋量比较见表 1.1。

1.2.2 国外的应用现状

弹性设计法由于没有考虑钢筋混凝土构件初裂后扭转刚度的显著降低而产生的内力重分布影响，扭矩设计值偏大，受扭梁内的受扭纵筋和箍筋配置过多，破坏时梁内箍筋与纵筋都没有屈服，而混凝土压碎，所以弹性设计法偏不安全，目前在工程设计中已经很少采用^[13]。

表 1.1: 三种设计方法配筋量

设计方法	弹性法	零刚度法	塑性法
纵筋 (kg)	390	290	270
箍筋 (kg)	180	80	90
总计 (kg)	570(100%)	370(64%)	360(63%)

零刚度法假定边梁的扭转刚度为零, 相应的协调扭矩自然为零, 而通过配置抗扭构造钢筋来满足其延性和裂缝控制要求。零刚度法影响较广, 有很多国家采用, 德国、新西兰、加拿大规范都采用的是零刚度法^{[14][15][16][17][18]}。有些学者认为“零刚度法”虽然简便, 但对有不同裂缝要求的结构不能灵活应用, 同时由于忽略了边梁的构造配筋的抗扭作用, 致使楼面梁配置了多余的正弯矩钢筋^[7]。

美国ACI318—1995 规范^[19]采用的是塑性调幅设计法。对于实心截面的初裂扭矩 T_{cr} , 美国规范采用箱形截面表达式, 并取壁厚 t 为 $0.75 \frac{A_{cp}}{P_{cp}}$, 剪力流中心所

包围的面积 A_0 为 $\frac{2A_{cp}}{3}$, 记入承载力折减系数 ϕ 中, 开裂扭矩的表达式为

$$T_{cr} = \phi \tau \times 2A_0 \times t = \phi 4 \sqrt{f'_c} \times \frac{A_{cp}^2}{P_{cp}} \quad (1.1)$$

式中: ϕ 为承载力折减系数, f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度, A_{cp} 、 P_{cp} 分别为构件的截面面积和周长。弯剪扭共同作用下的复合受力构件, 与构件初裂扭矩相应的扭剪力 τ 约为 $4\sqrt{f'_c}$ 。

为了控制受扭裂缝的宽度, ACI 规范规定, 当扭矩设计值大于开裂扭矩时, 取 $T = T_{cr}$ 进行配筋计算。还规定: 当按弹性分析的扭矩设计值小于 $\frac{1}{4}T_{cr}$ 时, 可以

忽略扭矩的作用。按弹性分析的扭矩设计值 $\frac{1}{4}T_{cr} \leq T \leq T_{cr}$ 时, 按弹性分析的弹性扭矩值直接进行配筋计算。同时 ACI 规范规定, 对于协调扭转, 除了按上述规定进行配筋计算外, 尚应满足受扭钢筋的最小配筋率以及构造要求。ACI 指出, 对于典型和规则的构造情况, 上述协调扭转设计方法是适用的。对于较大扭转变形的情况, 例如较大扭矩作用于刚性柱附近的情况, 规范建议作更精确的分析。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库