

北京高校第八届青年教师教学基本功比赛教案

教案主题：高强度螺栓连接

比赛类别：理工类

比赛组别：A

选手姓名：施 刚

北京高校第八届青年教师教学基本功比赛教案

高强度螺栓连接

(High Strength Bolted Connections)

课程名称：《钢结构》

课程类型：专业基础课

授课对象：土木工程专业 三年级本科生

2013年5月22-24日

一. 课程一般信息

【课程名称】

中文：钢结构

英文：Steel Structures

【课程类型】

专业基础课

【教学对象】

土木工程专业 三年级本科生

【课程内容简介】

主要讲授钢结构基本构件和连接节点的受力性能、承载力和变形计算方法及其构造要求，使学生掌握钢结构基本构件和连接节点的基本原理和设计计算方法。本课程是学习《钢结构课程设计》、《高层建筑结构》、《建筑抗震设计》等专业课程的基础，也是从事结构工程相关工作的重要基础知识。

本课程是土木工程专业的核心课程，具有理论与工程实际紧密结合的特点，既有很强的工程性，又有系统的科学体系；既是先修的力学类课程的实际应用，又是后续专业课程的理论基础。通过本课程学习，应使学生在知识层次、能力层次以及思维层次上都得到提高。

【教学目标】

- ① 使学生熟悉各种钢结构基本构件和连接节点的受力性能，熟练掌握其设计计算方法；
- ② 采用研究型教学，使学生掌握分析钢结构构件和节点受力的原理和方法；
- ③ 将本课程与已修课和后续课融会贯通，引入科研前沿的内容，使学生了解学科知识体系，建立辩证的工程科学观。

【教材与参考书】

教材：

[1] 王国周，瞿履谦. 《钢结构—原理与设计》 清华大学出版社. 1998

参考书：

[1] 陈绍蕃，顾强. 《钢结构》 中国建筑工业出版社，2011

[2] 曹平周，朱兆泉. 《钢结构》中国电力出版社，2008

[3] Sriramulu Vinnakota. Steel structures : behavior and LRFD, McGraw-Hill Higher Education, 2006

[4] N.S. Trahair, M.A. Bradford, D.A. Nethercot, L. Gardner. The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3. Tayloe&Francis, 2008, 第四版

【前导课与后续课】

本课程的前导课为《理论力学》、《材料力学》和《结构力学》，后续课程为土木工程专业的多门专业课，包括《钢结构课程设计》、《高层建筑结构》、《建筑抗震设计》、《桥梁工程》等。

二. 单元教学信息

【教学内容】

在 50 分钟内讲授“第四章 钢结构的连接”中的“第 4.9 节 高强度螺栓连接”。（其中 20 分钟参赛演示内容为“高强度螺栓连接的抗拉性能”）

【教学目标】

1、知识层面

- 掌握预拉力在高强度螺栓连接抗拉和抗剪性能中的力学作用机理；
- 掌握高强度螺栓连接抗拉和抗剪承载力设计方法；
- 了解高强度螺栓连接在实际钢结构工程中的应用以及科研前沿进展。

2、能力层面

- 针对施加预拉力后的高强度螺栓连接，会分析其受力性能；
- 针对高强度螺栓施加预拉力后所夹钢板间有预压力这一复杂受力体，学会采用模型化的方法分析其受力；
- 会根据两种极限状态分析两类高强度螺栓连接抗剪性能的破坏状态，计算对应的承载力。

3、思维层面

- 认识到高强度螺栓连接与普通螺栓连接看上去相同，但由于高强度螺栓施加了预拉力，其受力性能和分析方法发生很大改变；从而认识到，看事物要看本质，而不能仅看表象；
- 从创新的角度，认识到，对于新事物（高强度螺栓），不能简单套用旧方法（普通螺栓的分析方法），要勇于打破习惯思维，新东西要有新理论、新方法、新用法；
- 理解科学技术与经济文化人文的必然联系，认识到我国科学技术发展应坚持走自主创新之路。

三. 单元教学重点

在前一节“第 4.8 节 普通螺栓连接”中已经讲授了普通螺栓连接抗剪和抗拉性能分析和设计方法。本节的教学重点是：

1、施加预拉力后的高强度螺栓连接抗拉性能分析

高强度螺栓连接是钢结构的主要连接形式之一，由于施加了预拉力，其抗拉性能的受力机理与之前讲授的普通螺栓连接完全不同，其分析方法和力学性能很有自身特点。

本节需要详细讲解这一不同之处的原因，即预拉力的作用机理和受力分析方法。而在受力分析过程中，螺栓施加预拉力后的受力状态以及螺栓所夹钢板的受力分析是关键，其中，采用模型化的方法将螺栓所夹钢“板”抽象成“杆”的分析过程是讲课内容重点之一，也是学生们需要掌握的方法论知识。同时，采用参赛教师所进行的计算机仿真实验结果对物理模型进行科学验证，也是需要向学生强调的一点。教学中还要对上述分析的定量结论解释其物理意义。

在这一部分内容中，预拉力是一个重要影响因素，本部分教学中结合该领域的最新前沿科研进展，讲解预拉力的不确定性，进而推广到工程科学问题本身的不确定性和所需科研工作的长期性，以增强学生对本领域科学技术的认识。

2、高强度螺栓连接抗剪性能

高强度螺栓连接的抗剪性能根据所取的极限状态分为两类：摩擦型和承压型。本部分教学内容要强调，这两种类型的抗剪连接在物理实体上其实是同一个东西，只不过人为所取的极限状态不同——摩擦型是以螺栓和钢板之间发生滑移作为破坏，而承压型是以螺栓杆和孔壁接触后的螺栓杆剪断和孔壁承压作为破坏。这里需要向学生解释，同一个结构或部件，其受力全过程是客观的，但是取哪一点作为破坏点则是主观的；摩擦型和承压型连接其实是同一个东西，但是我们取的破坏点不同，所以所对应的承载力不同。

基于两种极限状态所对应的不同破坏状态，利用学生已经掌握的力学知识，讲解每种破坏状态所对应的承载力：①摩擦型连接发生滑移时所对应的抗剪承载力即为摩擦力，可根据钢板间预压力计算得到；②承压型连接包括两种破坏模式，螺栓杆剪断和孔壁承压，可以分别计算得到承载力，并从工程安全的角度取两者的较小值作为抗剪承载力。

四. 学生特点与教学难点分析

1、“打破习惯思维”

学生先修过《理论力学》、《材料力学》和《结构力学》三门课程。对于结构的受力分析已经熟练掌握，特别是隔离体法、作用力和反作用力、力的平衡方程等；但是之前所接触的受力分析，都很直观和直接，结构内部都没有事先存在一个自平衡的力和反作用力。而对于高强度螺栓，由于施加了预拉力，所夹钢板间存在预压力，螺栓以及所夹钢板的受力状态复杂，既看不见，也很难测量，理解起来较为困难。因此，初学者会习惯性地根据已经掌握的受力分析知识，套用以前的方法，简单地认为外荷载由螺栓直接承担，外荷载的增量就是螺栓拉力的增量，而没有清楚地认识预拉力的作用机理，更不知道如何正确地分析其受力性能，会得到错误结论。

针对这一问题，参赛教师在本部分教学中，从高强度螺栓连接最初的受力分析

出发，先是给出了螺栓施加预拉力的有限元计算结果，帮助学生理解其实际受力状态；然后将预压力分布范围内的钢板作为隔离体取出，并用有限元计算结果验证了所取钢板面积的合理性；进而通过模型化的方法建立物理力学模型，运用学生们已经掌握的力学知识进行受力分析，推导得到“外荷载的增量并不等于螺栓拉力的增量”，“外荷载的平衡主要靠钢板间预压力的减小，而螺栓拉力增加很少”这一“意外的”、“奇妙的”结论。

2、“突破直观感觉”

学生们经过前修的力学类课程的学习，普遍熟练掌握了力学分析的方法，并深刻理解结构受力的知识和结论。但是在这些课程的学习中，“力”通常都是作为“外荷载”施加到结构上，使结构产生应力和变形，也就是所谓的“荷载效应”。而在土木工程专业的相关课程中，很重要的一点中心思想就是“克服或者抵抗荷载效应”，从而“保证结构的安全性和适用性”。这导致学生们容易形成错误的固化思维，即“力就是荷载，荷载都是不好的，要克服的；所以力越小越好，结构越安全”。

而本部分的教学内容中，对于高强度螺栓连接，在承受外荷载之前，就先给螺栓人为施加了一个预拉力。学生们不禁会疑惑，“为什么要先施加一个预拉力呢？力不都是不好的、要克服的吗？这样不会降低承载力吗？”显然，学生们的认识局限在现象表面，而抓不住本质。

参赛教师则从螺栓施加预拉力开始分析，根据学生们已经掌握的力和反作用力的关系很容易得到螺栓预拉力会在所夹钢板间产生预压力，然后将有预压力分布的钢板作为隔离体进行分析，得到外荷载和螺栓拉力变化、钢板间预压力变化的定量关系，画成曲线，让学生们理解受力全过程；并且将没有施加预拉力的结果也画在同一个图中进行对比，让学生们理解施加预拉力后螺栓连接受力性能的具体变化和预拉力的作用机理。特别是，参赛教师还针对定量结论给出了其物理解释，让学生深刻理解为什么其受力性能与自己原先想象的不同，从而引导学生们突破原有的直观感觉，建立正确的认识和思想。

3、“拓展国际视野，立足学科前沿”

学生们通过之前先修课程主要是学习了力学基本理论知识，对于专业课程知识的学习，也较多地局限于我国的设计理论和设计方法，而很少了解国外情况，更不知道国内外有什么差别、为什么有这种差别，“缺乏国际视野”。同时，土木工程是一个古老的学科，历史悠久，学生容易先入为主地认为包括钢结构在内的相关知识比较陈旧，没有新意，是“夕阳学科”，没有什么发展了，从而影响学习兴趣。

参赛教师紧密结合本部分教学内容中“国内利用高强度螺栓的预拉力而国外并不用”这一差别，介绍了国外的发展情况，并解释了国内外差别的原因，让学生们全面了解该领域国内外发展动向，建立国际化视野；又深刻理解我国国情的特殊性，坚定我们具有自主原始创新能力的信心。同时，针对高强度螺栓预拉力的重要性和研究的必要性，介绍本人研究组的一些最新成果，使学生们认识到，土木工程中不断有新技术、新材料出现，也产生新的问题需要研究解决，不断有新的研究成果出现；材料性能和结构性能不断提高，相应的理论和方法也不断更新发展，有很多是

科技含量很高的内容。这样对学生有很强的吸引力，有助于学生增强对土木工程学科领域的认识，激发学生的学习兴趣，树立正确的专业观念以及在本专业大有作为、能够做出国际领先成果的信心。

五、教学创新点与教学理念

1、突破传统教材上“只给结论、不讲分析”，或“只有数学分析、没有物理解释”的注入式讲课模式

参赛教师查阅了国内外现有的二十多本《钢结构》教材，其中包括我国钢结构领域开山鼻祖的两位资深教授所编写的经典《钢结构》教材（王国周，《钢结构—原理与设计》，清华大学出版社，1998年；陈绍蕃，《钢结构》，中国建筑工业出版社，2011年）。发现所有这些教材在讲“有预拉力的高强度螺栓连接抗拉性能”时，对于其中最为困难和复杂的螺栓所夹钢板的受力分析，都是直接给出结论性公式

$$C \rightarrow C' = C - \Delta C = C - \frac{EA_c \delta}{\sum t}$$

“杆”的虎克定律公式的理由。这种原型是“板”、模型却是“杆”的力学模型分析的缺失，只能让学生死记硬背结论，认为“你书上说什么就是什么，你说的都是对的”。

另外，这些国内外现有的传统《钢结构》教材，对于讲授“有预拉力的高强度螺栓连接承受拉力荷载时螺栓拉力和钢板间压力的变化”部分内容，都是基于基本公式进行数学推导。在得到螺栓拉力变化 ΔP 和钢板间压力变化 ΔC 随单个螺栓承担

$$\text{拉力 } N_1 \text{ 的定量关系 } \Delta P = \frac{N_1}{1.1}, \Delta C = \frac{N_1}{1.1} \text{ 后，不再给学生解释定量结论所对应的}$$

物理意义。这种“重数学推导，轻物理背景”的问题较为突出。这样，不能让学生深刻理解知识的物理本质，其效果同样是让学生只能死记硬背数学公式。

参赛教师突破了传统教材这种注入式讲课模式，针对螺栓所夹钢板的受力分析，重点讲解了如何建立物理模型问题，使数学公式的推导过程建立在坚实的物理模型基础之上；同时，对于数学定量关系结论，又从受力分析的物理概念上解释了螺栓拉力、钢板间压力、单个螺栓承担拉力之间的静力学平衡关系，以及

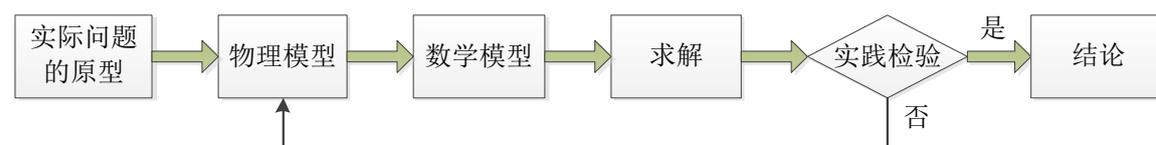
$$\Delta P = \frac{N_1}{1.1}, \Delta C = \frac{N_1}{1.1} \text{ 的物理本质。}$$

教学理念 德国著名哲学家和科学家康德说，“重要不是给予思想而是给予思维”。在教学上，所谓“思想”就是所讲授知识的结果；而“思维”则是在讲授知识结果中所体现的思考过程。讲知识的结果，必须突出研究的方法和过程；不仅有数学分析的过程，而且还要有物理意义和本质的解释。这是一种启发式讲课，这与传统教

材那种注入式的讲课模式完全相反。

2、引入计算机仿真实验，使模型化的研究方法论得以科学认定

实际土木工程结构的受力状态非常复杂，要直接根据已经学习和掌握的力学知识进行理论分析非常困难。科学上的模型化方法是将所研究分析的对象进行合理的简化，先提炼出符合一定条件的物理模型，再运用已有的理论知识抽象出数学模型，进而通过计算得到结果，再经实践检验得到正确结论。这是科学研究简单化原则的直接体现。如下图所示：



从图中模型化方法的流程可以看出，所采用的物理模型正确与否，直接关系到分析的成败，十分重要。因此，物理模型简化必须是有根据的、合理的。

物理模型简化本身就是科学研究过程，甚至是某些科研项目的重点和难点。这个简化过程需要研究者的想象，而且要在想象后经过科学的认定。

在本单元课的教学内容中，螺栓所夹钢板的原型是“板”，受力状态和边界条件复杂，其计算模型也很复杂，学生无法根据已经学习过的知识直接进行受力分析，因此必须要进行模型简化。这一过程中，由于螺栓是被周围钢板包围，施加预拉力后，螺栓本身以及所夹钢板的受力状态既看不见，也很难测量，所以很难抽象出一个既简化而又合理的物理模型。参赛教师紧密结合本领域近年来用有限元较为准确模拟螺栓中的预拉力和所夹钢板之间的接触问题这一最新研究进展，采用计算机仿真实验的方法，先是给出了施加预拉力时螺栓中应力变化的全过程，然后又给出了钢板间预压力较为准确的分布范围和分布状态。并且通过可视化的形象结果，帮助学生直观地观察受力现象和理解力学机理；这样基于计算机仿真实验科学认定的结果，详细地讲解了如何将“板”从结构中“挖”出来，变成“杆”，从而能够运用学生已经学习的适用于“杆”的虎克定律来分析其受力，给出推导全过程，解释了模型简化的方法，并揭示了“板”和“杆”两者“形不似而神似”的特点。

教学理念 模型化的方法是科学研究中常用的方法。结合现代科技发展，采用计算机仿真实验对模型化的构想进行科学认定，就在一定程度上保证了模型简化的正确性。既让学生掌握了知识，也让他们掌握了这一科学方法论。

需要特别指出，**计算机实验是现代的新科学方法论**，它是实际实验的补充，甚至是取代，如地质学中的地壳运动就是实际实验所无法实现的；现代物理学中一些重要的新成果，如1978年发现的分岔现象和湍流模型的普适性，就是通过计算机实验实现的。这一方法需要在教学中予以强调。

3、介绍发达国家应用“有预拉力螺栓技术”的不同，引申说明科学技术的发生离不开一定的人文环境

美国和欧洲等西方发达国家在二十世纪四十年代最先在土木工程中使用高强度螺栓。但是他们在钢结构工程中的主流却是对高强度螺栓并不施加预拉力。讲课中所进行的这一介绍引起了同学的疑惑和兴趣，他们说：“老师讲的人家根本就不用，那你讲的这些还有什么意义呢？”。参赛教师并不直接回答这个问题，而是继续分析到，这和这些国家当时的经济文化环境密切相关。由于他们的经济文化已经达到了一定发达阶段，相对来说，材料便宜而人工成本昂贵；他们认为，预拉力的施工控制较难做到准确可靠，所需人工成本又很高，特别是，螺栓预拉力随时间的长期变化规律尚不完全确定，于是才采取了上述做法。

而我国在二十世纪六十年代才开始使用高强度螺栓。当时国家经济实力和钢材产量有限。相对来说材料昂贵而人工便宜。这才不得不想尽办法充分利用材料，即利用预拉力的有利作用，提高结构刚度，减小结构变形。就是这样，当时借鉴了西方国家提出的对螺栓施加预拉力的思想（虽然他们在实际工程中并不采用），走了一条自己的路。

但是，中国现在富裕了，国家经济实力增强了，我们是不是要再回到西方发达国家的做法，对高强度螺栓也不施加预拉力呢？

参赛教师在课堂上对学生明确说：答案是否定的。

我国经过五十多年的探索，已经建立并发展了施加预拉力的高强度螺栓的受力分析理论，并在多年的工程实践中，积累了有效的工程经验，这包括预拉力的取值、预拉力与施工扭矩的计算关系、螺栓材性数据统计指标等。我国大量的工程实践证明，这一理论及其实践是较为安全可靠的，应该继续沿着我们自己的路走下去，并且进行更深入的有意义的探索，如：实际工程中螺栓预拉力随时间长期变化的规律，在国内外的研究中都是一项空白。参赛教师所在团队正在对位于深圳的两幢高层建筑钢结构中的高强度螺栓预拉力进行 10 年以上的长期监测，以最终取得更为准确的结果，保证我们在这条自主创新的路走得更更好。

《钢结构》是土木工程专业基础课，土木工程是地域经济文化环境特点很强的一门学科，它的英文名称是 Civil Engineering，而 Civil 在英文中本身就含有“国内的”这一含义，可见土木工程是紧密联系本国经济文化环境的一个学科。本节课所讲授的“高强度螺栓连接抗拉性能”也充分反映了这一特点，这正是科学与人文的密切关联所在。

教学理念 作为主要讲授工程技术的专业基础课，需要介绍和联系发达国家的发展动向；而发达国家和我们这样的发展中国家在经济文化环境上的巨大差异必然会带来工程技术发展中的不同，这有力地说明，科学和人文应该紧密结缘的重要意义。应该教育学生，我们要根据我国的经济政治文化环境，坚持走自己的路。

六、教学内容与设计

(20 分钟教学演示部分开始)

1、本节序言 引出本节课内容 共 2 分钟

- 提出螺栓是连接钢结构构件的一种重要形式(图 1),并以 2008 年南方雪灾中输电塔的倒塌证明螺栓连接的重要性。

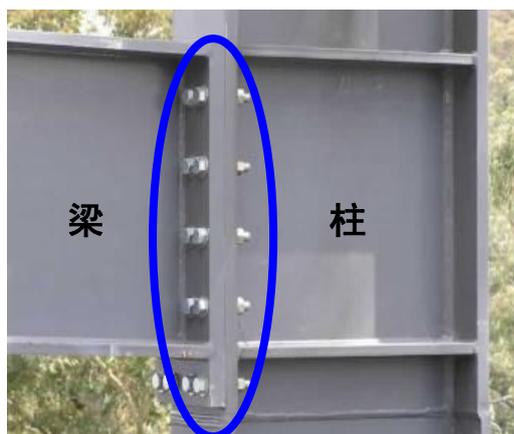


图 1 钢结构梁柱端板节点

- 螺栓连接包括两种类型：普通螺栓连接和高强度螺栓连接。
- **使用实物教具——展示一个高强度螺栓：螺栓头、螺母、螺栓杆、垫片。**
- 提示：这两种螺栓连接从外表是看不出区别的。引出问题：区别到底在哪里？
- 从而引出本节课的内容：高强度螺栓连接，其与普通螺栓连接的差别是：
 - ①螺栓所采用的钢材；
 - ②螺栓是否施加预拉力。
- 列出本节课的主要内容。

关键点：强调高强度螺栓连接和普通螺栓连接从外表是看不出区别的，从而与下文
中其受力状态和受力机理的不同形成鲜明对比。

2、高强度螺栓的钢材 基础知识 共 2 分钟

- 高强度螺栓的钢材包括两种：8.8 级和 10.9 级
 - ①小数点前的数字分别表示最低抗拉强度 f_u 属于 800MPa (实际为 830) 和 1000MPa (实际为 1040) 这一等级。
 - ②小数点后的数字表示屈强比，则 8.8 级和 10.9 级高强度螺栓的最低屈服强度 f_y 分别为

$$0.8 \times 830 = 660 \text{MPa}$$

$$0.9 \times 1040 = 940 \text{MPa}$$

③高强度螺栓的屈服强度比常用普通螺栓的 235MPa 高很多。

关键点：强调高强度螺栓在材料方面与普通螺栓的差别。

3、高强度螺栓连接的抗拉性能 **重点内容 1** **共 16 分钟**

- 我国设计规范要求高强度螺栓全部施加预拉力，提出预拉力的定义，并给出用计算机仿真实验模拟得到的螺栓施加预拉力后的应力分布图。 **1 分钟**
为了揭示预拉力对高强度螺栓抗拉性能的影响，先介绍没有施加预拉力的螺栓连接，其抗拉性能是如何分析计算的。
- 不施加预拉力的高强度螺栓连接的抗拉性能 **3 分钟**

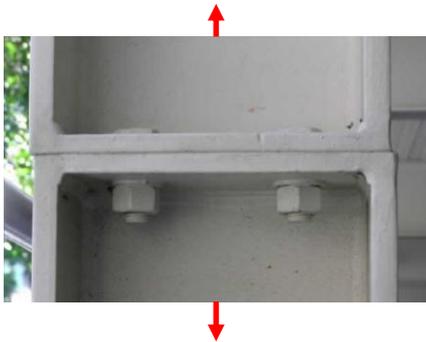


图 2 高强度螺栓连接节点
实际工程示例

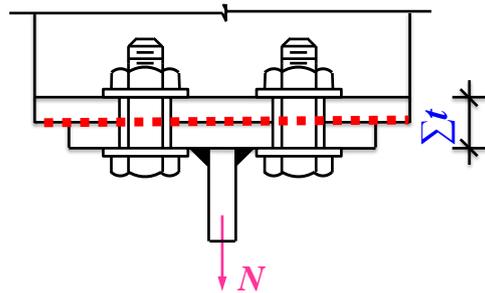


图 3 高强度螺栓连接简化分析模型

- ① 给出实际钢结构工程中高强度螺栓连接的一个实例（图 2），假设没有施加预拉力，建立分析其在外拉力荷载作用下的受力简化模型（图 3）；
- ② 采用学生们已经熟练掌握的隔离体法（图 4），分析连接的受力性能；得到其受力状态和分析计算与之前所学的普通螺栓连接完全相同；外荷载拉力 N ，每个螺栓均匀分担的拉力为 $N_1=N/n$

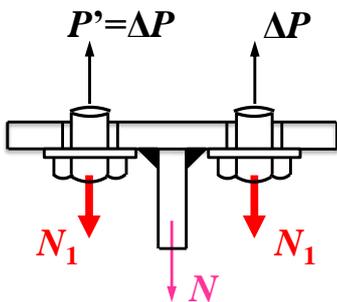


图 4 运用隔离体法分析受力

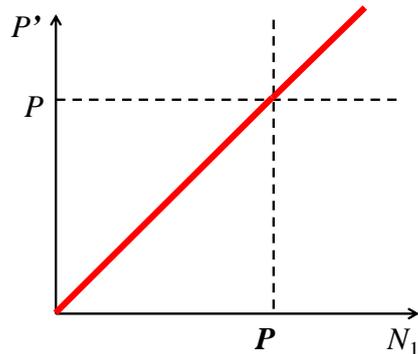


图 5 螺栓拉力随外荷载拉力的变化曲线

- ③ 螺栓杆截面的拉力：

$$P = 0 \rightarrow P' = P + \Delta P = \Delta P = N_1$$

关键点：强调螺栓杆截面拉力随螺栓所承担的拉力荷载 1:1 线性增加（图 5），外荷载的增加完全由螺栓承担，螺栓杆截面的拉力等于螺栓所承担的拉力外荷载。这将与下面所讲授的施加预拉力的高强度螺栓的抗拉性能完全不同，形成对比，让学生领略预拉力的奇妙之处！

● **施加预拉力的高强度螺栓连接的抗拉性能** 9 分钟

- ① 针对实际工程中准确控制高强度螺栓预拉力值这一难题，通过视频（图 6）介绍采用数控扭矩扳手在实际钢结构工程中具体如何给螺栓施加所设定的预拉力；

■ **使用实物教具——展示一个数控扭矩扳手。**

关键点：针对学生普遍缺乏工程实践知识和经验这一问题，通过视频，让学生直观形象地了解实际工程方法。



图 6 高强度螺栓预拉力施加的视频

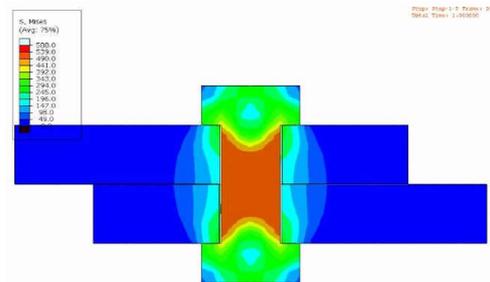


图 7 高强度螺栓预拉力数值模拟

- ② 通过有限元数值模拟动画（图 7），展示预拉力施加全过程所引起的高强度螺栓及其所夹钢板的应力状态变化。

关键点：高强度螺栓中预拉力的数值模拟，是本领域研究中比较困难的一个问题，也是本人的主要研究方向之一。基于近年来有限元技术的最新发展，结合本人的研究成果，将螺栓中预拉力引起的应力变化和分布通过动画展示出来，让学生直观地感受高强度螺栓中的预拉力，为下文讲授预拉力作用的力学机理奠定基础。

- ③ 重新列出之前给出的实际钢结构工程中高强度螺栓连接的一个实例（图 2），先用“强烈”的肢体语言和手势表示给螺栓施加预拉力，然后 ppt 配合显示高强度螺栓施加预拉力后，所夹钢板间接触面上会产生预压力（图 8）。
- ④ 给出施加预拉力的高强度螺栓连接的模型简图（图 9），螺栓杆内预拉力 P ，螺栓杆截面积 A_1 。钢板间预压力 $C=P$ ，分布在螺栓附近的钢板间接触面上

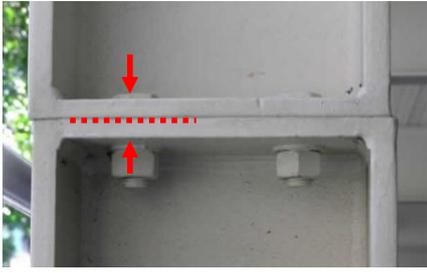


图 8 施加预拉力的高强度螺栓连接

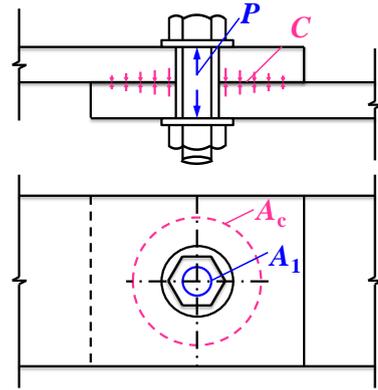


图 9 施加预拉力的高强度螺栓连接的模型简图

⑤ 施加预拉力的高强度螺栓连接的抗拉性能分析：

给出受力分析的模型简图（图 10）；

仍然采用隔离体法，螺栓拧紧后，杆内预拉力 P ，钢板间预压力 $C=P$ ，钢板总厚度 $\sum t$ （图 11）；

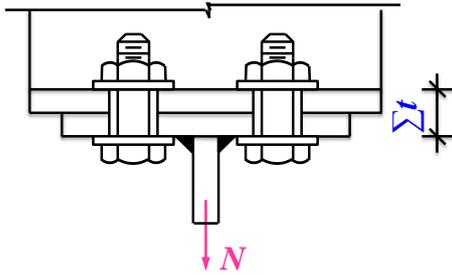


图 10 受力分析模型简图

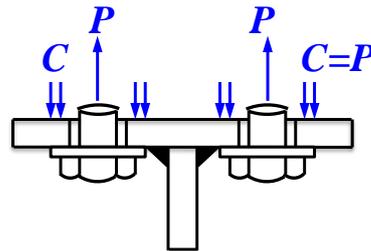


图 11 施加外荷载前的受力分析模型简图

受到外荷载拉力 N ，每个螺栓均匀分担的拉力为 $N_1=N/n$ ，单个螺栓受外拉力 N_1 ，螺栓杆伸长 δ ，钢板厚度也变化 δ （图 12）；

根据材料力学知识，螺栓杆可以简化为“杆”，根据虎克定律，螺栓杆拉力

$$\text{变化: } P \rightarrow P' = P + \Delta P = P + \frac{EA_1 \delta}{\sum t}$$

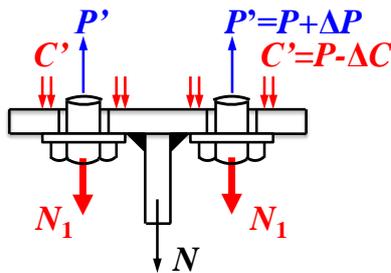


图 12 施加外荷载后的受力分析模型简图

⑥ 受到外荷载拉力 N ，钢板受力分析的模型化方法：

“板”：有预压力和外荷载计算模型很复杂，必须简化。

螺栓施加预拉力后，承担外荷载拉力 N 之前，钢板间预压力 $C=P$ ，分布在螺栓附近的钢板间接触面上，分布面积为 $A_c=?$ （图 9）

根据本人的研究成果，采用有限元数值模拟方法分析了两个典型的高强度螺栓连接中钢板间预压力的分布状态和范围（图 13）；分布范围的直径约是螺栓杆直径的 3.3 倍，分布面积 $A_c=\alpha A_1\approx 10A_1$ （这个公式写在黑板上，用于之后讲课再次引用）；

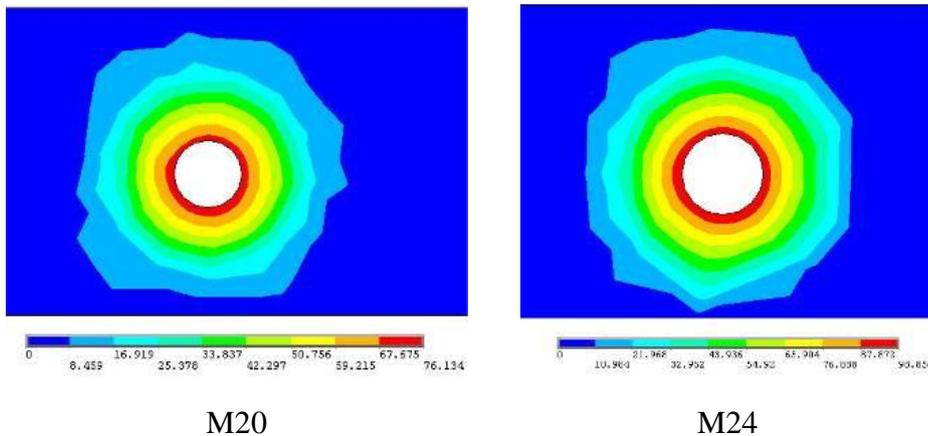


图 13 钢板间预压力的分布状态和范围

提问（与学生互动）： $A_c=10A_1$ 这个关系是否会变化？会受到哪些因素影响？

关键点：钢板间预压力的分布状态和范围是一个很复杂的问题，教材中仅仅是简单地说大约是螺栓杆截面积的 10~20 倍，且无法给出分布状态；本次课程结合这一领域的最新研究成果，准确地、直观形象地给出钢板间预压力的分布状态和范围。这一结果将直接用于下面的分析计算和公式推导中。

钢板间预压力的分布会受到很多因素的影响，是一个非常复杂的问题，在讲课过程中，我们用模型化的方法将其简化成 $A_c=\alpha A_1\approx 10A_1$ ，忽略了很多因素。通过思考题，让学生了解实际工程问题的复杂性，同时引发学生的思考和研究兴趣，突出研究型教学。

基于上述结果，可以得到，钢板对连接节点的受力性能有影响的部分仅仅是有预压力的部分；所以，对于钢板的受力分析，直接取图 9 中面积为 A_c 这一部分钢板，则简化为截面积为 A_c 、长度为 Σt 的轴心受压杆，受到外荷载拉力 N ，每个螺栓均匀分担的拉力为 N_1 ，螺栓杆伸长 δ ，钢板厚度也变化 δ ；运用材料力学的知识得到：

$$\text{钢板间压力的变化: } C \rightarrow C' = C - \Delta C = C - \frac{EA_c \delta}{\sum t}$$

关键点: 分析钢板受力的模型化方法, 既是本节课内容的难点, 也是亮点; 通过这部分内容的讲授, 培养和提高学生将实际工程复杂问题简化抽象成合理的力学模型的能力, 从而发现问题、思考问题、简化问题、解决问题。

- ⑦ 单个螺栓受外拉力 N_1 , 根据内外力平衡 (图 12), 计算得到螺栓拉力变化和钢板间预压力的变化:

$$N_1 = P' - C' = \Delta P + \Delta C$$

其中, $A_c = \alpha A_1$, 所以 $\Delta C = \alpha \Delta P$, 代入上式得到

$$\Delta P = \frac{N_1}{\alpha + 1}, \quad \Delta C = \alpha \Delta P = \frac{\alpha N_1}{\alpha + 1}$$

取 $\alpha = 10$,

$$\Delta P = \frac{N_1}{11}, \quad \Delta C = \frac{N_1}{1.1}$$

$$\text{当 } N_1 = 0.8P, P' = P + \Delta P = 1.073P$$

$$C' = C - \Delta C = 0.273C$$

$$\text{当 } N_1 = 1.1P, P' = 1.1P$$

$$C' = 0$$

螺栓拉力 P' 和钢板间压力 C' 随螺栓所承担的荷载 N_1 的变化曲线如图 14 所示:

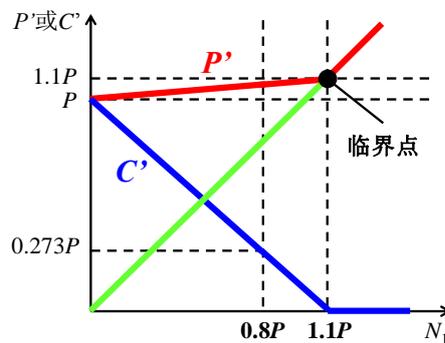


图 14 螺栓拉力 P' 和钢板间压力 C' 的变化曲线

图 14 中绿色曲线和红色曲线分别是没有预拉力和施加了预拉力的高强度螺栓连接在受到拉力荷载后, 螺栓杆截面拉力的变化曲线, 比较这两条曲线,

同时比较图中蓝色曲线（钢板间压力随螺栓承担外荷载的变化曲线）可以得到**定量计算结论：当外荷载增加到板即将脱离前，螺栓杆力的增加很小，而外荷载主要由板承担。**

先提出问题：我们怎么从物理概念上来理解这一点？蓝线降到零了，而红线升高很小。

解释其物理意义：1、 N 直接作用在板上，向下的 N_1 和向下的 C' 共同配合来平衡向上的 P' ；2、另外，如果把 N_1 分成 11 份，有 10 份作用在板上，1 份作用在螺栓杆上，所以这一份引起杆的拉伸变形很小，也就是 N 的主要部分是用于放松板的原来的压缩变形。

用图分步展示和比较施加和不施加预拉力高强度螺栓连接受力性能的差别，得到：**外力 N_1 的平衡主要靠钢板间预压力 C 的减小，而螺栓拉力 P 增加不多，连接的变形减小，刚度增大，提高了结构的受力性能。**

关键点：这是本节课的主要结论和知识点，正是高强度螺栓预拉力的奇妙之处；其受力机理也与学生们之前学习的理论力学、材料力学知识完全不同。

● 高强度螺栓预拉力的松弛

3 分钟

提出问题（与学生互动）：实际工程中，高强度螺栓的预拉力是否恒定不变的？

- ① 列举影响因素：材料蠕变，使用荷载，风，地震，等；高强度螺栓的预拉力会随时间发生一定的松弛和损失，根据上面的公式推导可知，预拉力的损失值显然会影响连接的受力性能，所以，确定这一数值很重要，但是很难。
- ② 介绍国内外钢结构设计规范所规定的数值，并与国外实验室和本人课题组的实测结果（图 15）进行比较，指出目前在这一领域的研究存在的不足；介绍本人课题组正在对国内两个高层建筑钢结构实际工程（图 16、图 17）中的高强度螺栓预拉力进行长期监测，这项研究成果将居于国际领先地位。

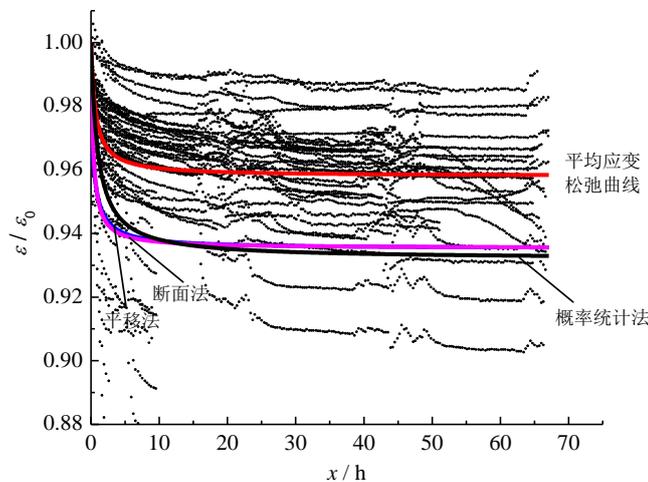


图 15 高强度螺栓预拉力随时间变化实测结果



图 16 深圳国信大厦
(55层, 高 238m)



图 17 深圳能源总部大厦
(42层, 222m)

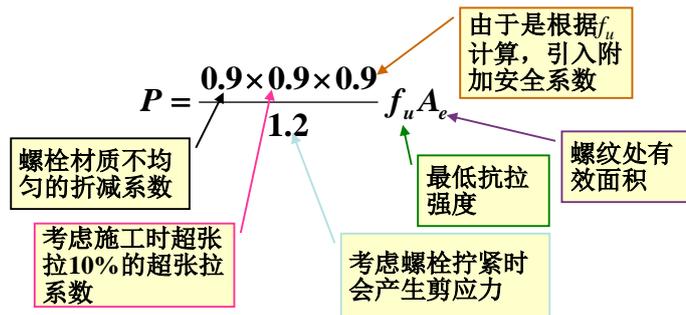
关键点: 向学生表明, 仍然有很多复杂的工程实际问题没有研究和得到解决, 让学生感到本学科还有很大的发展空间, 树立学生的专业信念; 同时, 向学生展示本人课题组在该领域领先的研究成果, 增强学生独立自主做好研究的信心和勇气。

(20 分钟教学演示部分结束)

● 高强度螺栓连接抗拉承载力设计方法

5 分钟

① 高强度螺栓预拉力设计值的确定方法:



逐项解释上述每个影响因素。

我国钢结构工程中一个高强度螺栓的预拉力设计值:

一个高强度螺栓的预拉力 P (kN)

螺栓的性能等级	螺栓公称直径 (mm)					
	M16	M20	M22	M24	M27	M30
8.8 级	80	125	150	175	230	280
10.9 级	100	155	190	225	290	355

② 确定高强度螺栓连接抗拉承载力：

实际钢结构工程中，要求 C' 不要降低太多，P' 不要增加过多，且钢板不能脱离；

单个高强度螺栓抗拉承载力设计值 $N_t^b = 0.8P$

4、高强度螺栓连接的抗剪性能 **重点内容 2** **共 22 分钟**

- 回顾普通螺栓连接的抗剪性能分析和承载力计算方法，强调其抗剪机理是孔壁承压； 1 分钟
- 列举一个高强度螺栓抗剪的钢结构工程实例（图 18）； 1 分钟



图 18 高强度螺栓连接抗剪

- 高强度螺栓连接抗剪分为两类，分别介绍： 17 分钟

① 摩擦型连接

解释其抗剪机理主要是：由于螺栓施加了预拉力，钢板间有预压力，从而在钢板间产生摩擦力，抵抗剪力（图 19）。取其抗剪极限状态为螺栓和钢板发生滑移，则抗剪承载力设计值为：

$$N_v^b = 0.9 n_f \mu P$$

抗力分项系数
(1.1)的倒数

传力摩擦面数目，
单剪用**1**，双剪用**2**

预拉力

抗滑移系数

逐项解释每个参数的含义。针对图 19，提出问题：如果螺栓夹住了多块钢板，抗剪承载力是多少？引出图 20 所示的传力摩擦面数量为多个的一般情况，从而得到通用的公式。

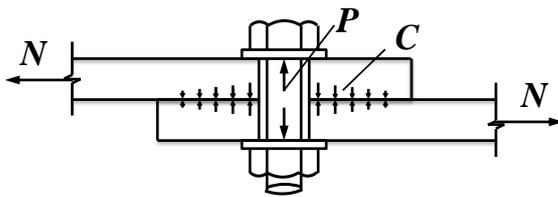


图 19 高强度螺栓摩擦型连接抗剪

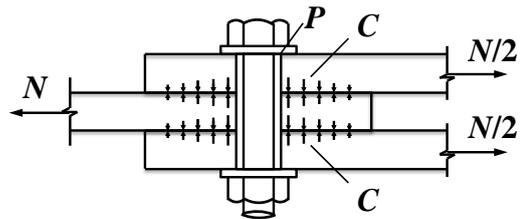


图 20 多个摩擦面的抗剪计算

提出问题（与学生互动）：当剪力超过摩擦力，螺栓和钢板发生滑移，这个连接是否能继续抗剪？其抗剪承载力如何计算？引出下面要讲授的承压型连接。

关键点：这个问题的答案恰恰是高强度螺栓摩擦型连接和承压型连接的本质区别。

② 承压型连接

当剪力超过摩擦力，螺栓和钢板发生滑移，直至螺栓杆与孔壁一侧接触，然后连接靠螺栓杆剪切和孔壁承压连同摩擦力继续受力（抗剪），直至剪切或承压破坏。取这一状态作为极限状态，则其抗剪承载力取决于以下三种破坏情况及其相应的抗剪承载力：

$$(I) \quad \text{螺栓杆剪切破坏, } N_{v1}^b = n_v \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) f_v^b$$

$$(II) \quad \text{正常使用阶段不滑移, } N_{v2}^b = 1.3 N_v^b = 1.3 \times 0.9 n_f \mu P$$

$$(III) \quad \text{孔壁承压破坏, } N_c^b = d \cdot \sum t \cdot f_c^b$$

逐项解释上述公式的力学机理、每个参数的含义；

承压型连接抗剪承载力取三者较小值： $N_{v\min}^b = \min(N_{v1}^b, N_{v2}^b, N_c^b)$

- 比较分析摩擦型连接和承压型连接的异同、优缺点：3 分钟
两者在钢材、预拉力施加、构件接触面处理等技术要求上都完全相同，抗拉承载力也完全相同；
区别仅在于抗剪时所取的极限状态不同；
因此，承压型连接的抗剪承载力高于摩擦型连接；而摩擦型连接由于所允许的变形小，所以刚度大，整体受力性能更好，更适用于直接承受动力荷载的结构。

5、 本节知识点小结

3 分钟

- 高强度螺栓的钢材性能；
- 预拉力在高强度螺栓连接抗拉和抗剪性能中的力学作用机理；

- 高强度螺栓连接抗剪的两种类型及其对应的破坏状态；
- 高强度螺栓连接抗拉和抗剪承载力设计方法；
- 高强度螺栓连接在实际钢结构工程中的应用以及科研前沿进展。