

建筑/土木工程发言稿

第07A章：

不锈钢钢筋的结构应用

参见：stainlesssteelrebar.org

选错材料，会引发大问题



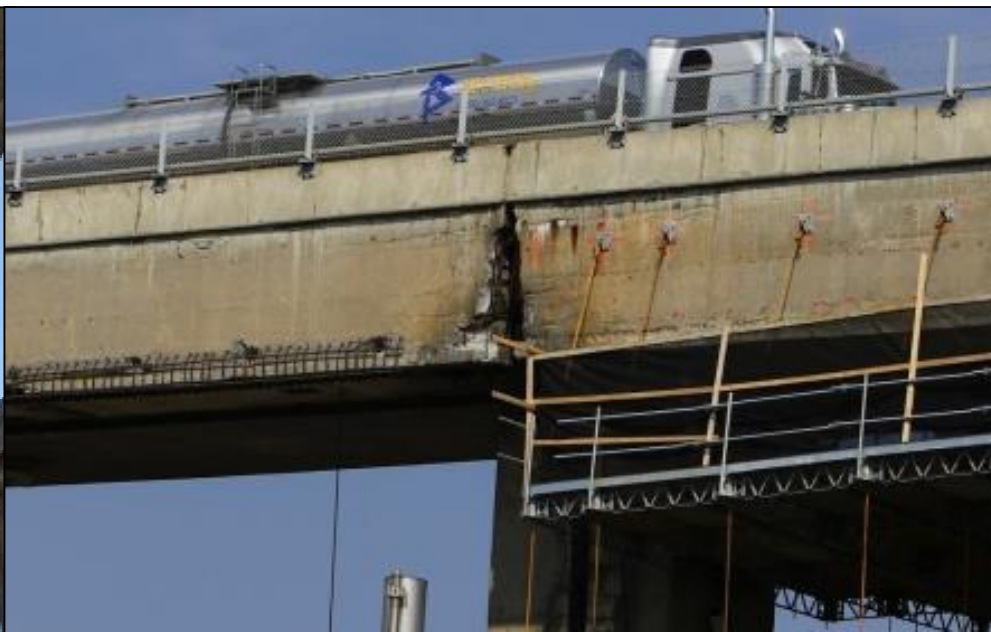


案例教材： 蒙特利尔Turcot立交桥出现了腐蚀^{1,2}

- 位于德卡利高速（南北向）和维尔玛丽（东西向）高速公路的主要立交桥建于1996年。
- 每天超过30万辆车
- 材料为钢筋混凝土，由于使用除冰盐，目前腐蚀情况很严重

将被替换掉

- 要不就去掉，要不就部分替换掉，这样就不用经常监督，经常维护，
 - 目前估计成本为30亿加元
 - 此外处于安全考虑，还需要花2.54亿加元，知道2018年完全替换掉。
- 结构的寿命将只有50年！

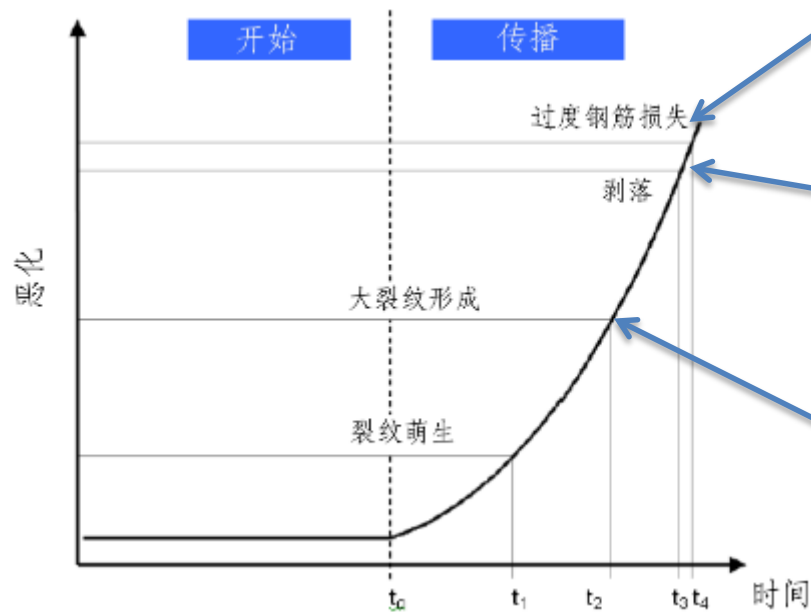


腐蚀如何破坏钢筋混凝土的

腐蚀离子（通常是氯化物）在混凝土中的扩散

步骤³:

1. 一旦腐蚀离子到达碳钢筋 (t_0)，腐蚀就出现了
2. 腐蚀产物的体积要大于钢，会产生向外的压力
3. 混凝土出现开裂 (t_1)，氯离子容易进入
4. 混凝土层开裂（剥落）(t_3)，露出钢筋
5. 如果不管它，会继续腐蚀，知道钢筋无法支撑产生的拉伸应力，于是结构会坍塌 (t_4)



混凝土裂缝加速腐蚀

混凝土经常会出现开裂，腐蚀离子会通过这些裂纹，快速接触钢。

开裂形成的原因（参考4）。

请注意，开裂不是立刻出现的，它也会出现在无法维修的封闭区域。

开裂种类	开裂的形状	主要原因	出现的事件
塑性沉降	在上边，和钢筋平齐	钢筋周围沉降；混合物中水分过多	10 分钟到三个小时
塑性收缩	对角线或随机	过早蒸发	30 分钟到6个小时
热膨胀与收缩	横向（例如：横穿人行道）	产生过多热量，或者产生温度梯度	一、两天或三周
干燥收缩	横向或花纹	混合物中水分过多；接头位置不好，接头间距过大。	几周到几个月
冻结和解冻	与混凝土表面水平	加气处理不充分；非耐久粗骨料	一个或更多的冬天
钢筋腐蚀	在钢筋上方	混凝土保护层不足；水分和氯离子锈蚀	两年多
碱骨料反应	花纹开裂；与接头处或边界平行	活性骨料加水分	典型情况下是五年多，但是有了高活性骨料，会更快
硫酸盐反应	花纹开裂	内部和外部的硫酸盐形成钙矾石	一到五年

选择合适材料是良好的长期投资

普罗格勒索码头(1/3)^{5,6}



1970年墨西哥普罗格勒索修建了一个码头。
海洋环境腐蚀碳钢钢筋——结构坍塌了。

普罗格勒索码头(2/3)



隔壁的码头是在1937 - 1941 期间建成的，里面用了不锈钢钢筋。

普罗格勒索码头 (3/3)

用不锈钢建设的
可持续性
的土木工程



自此之后，就不需维护，并保持原装。

目前，重大的土木工程的寿命
必须超过100年

Haynes Inlet Slough桥，美国俄勒冈2004^{7,8}

这是一座不同寻常的拱桥，桥体用了中400吨不锈钢钢筋。

230米长跨越海恩斯入口沼泽的拱桥的预计使用寿命是12年，而且毋需维护。

尽管不锈钢成本比普通钢高很多，但是全生命周期却大幅得以节约。





港珠澳大桥⁹ (建设始于2009年, 2018完工)

著名的港珠澳大桥是全球最大的桥梁项目之一。使用寿命为免维修120年。因此大桥结构的关键区域, 主要是海水泼溅区, 使用了不锈钢钢筋。该桥共使用了150亿吨的不锈钢。



布罗德梅多桥，爱尔兰都柏林（2003）¹⁰

是布罗德梅多河口新建的一座大桥，桥柱和护墙共使用了10500万吨不锈钢钢筋。

海堤维护，法国贝约讷

海堤修建于60年代，用来保护海港入口

海堤临海那面要高一些，由40吨砖砌成，由于暴雨的侵蚀，需要替换。

临河面由7米宽的平台，重型吊车可以在这个平台上作业。

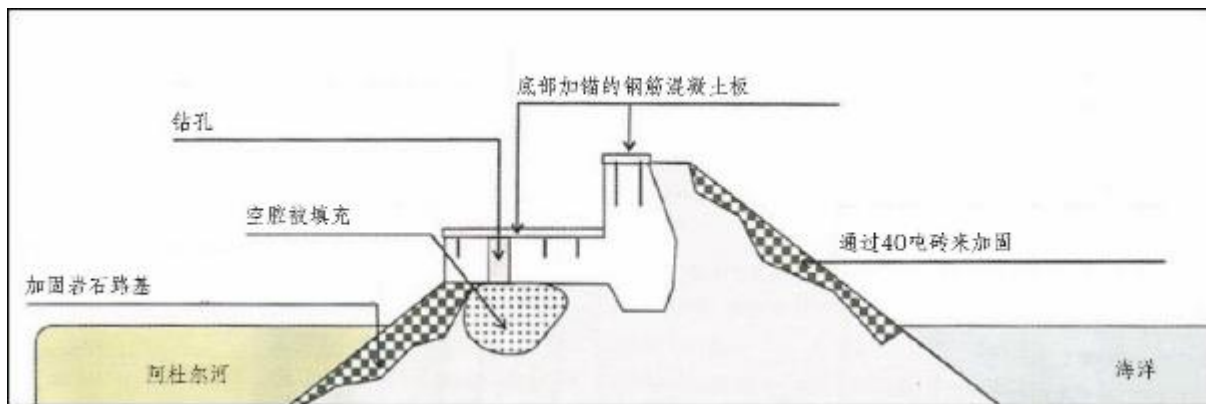


航拍图

除了裂缝的甲板和墙体需要维修



海堤的横截面



海堤修复，法国巴约讷

平台和海堤使用了节约型双相不锈钢钢筋（EN 1.4362）¹¹

正在维修的海堤

2014年出坝上的大风





香港昂船洲大桥^{12, 13}

全球跨度第二大斜拉桥，整体跨度为1,018米

桥塔高298米，斜拉索锚固区的结构钢重1600吨，桥塔的钢筋混凝土下部的不锈钢钢筋重2800吨。



带状公园大道，美国布鲁克林（2004）¹⁴

为了确保大道的耐久性（100年），并且在当地海洋环境及道路盐环境中的耐腐蚀性，桥梁组件和栏杆护栏因此使用了不锈钢2205钢筋。

什么时候考虑选用不锈钢钢筋¹⁵⁻²⁰：

- 在腐蚀环境中：
- 海水甚至在炎热其后区域使用更多：
 - 桥梁
 - 桥墩
 - 码头
 - 灯柱锚，栏杆….
 - 海堤
 - …..
- 除冰盐
 - 桥梁
 - 交通立交桥和交叉口
 - 停车场
- 废水处理罐
- 海水淡化厂
- I需要较长使用寿命的结构
 - 修复历史建筑结构
 - 核废物存储
- 在下列环境里，
 - 不可能检查的地方，
 - 不可能修理的地方，或者修理费用昂贵的位置

不锈钢棒和其他方案的比较¹⁵⁻²⁰

	优点	缺点
环氧树脂涂料	初始成本更低	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 不能弯曲，否则会断裂 ▪ 需要审慎处理，避免安装损坏
镀锌	初始成本更低	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 不能弯曲，容易断裂 ▪ 一旦镀锌层被腐蚀，就不能用了。
纤维增强聚合物	初始成本更低	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 不能弯曲，容易断裂 ▪ 不耐热，在寒冬离的耐冲击性很差 ▪ 刚度低于不锈钢 ▪ 不能回收
不锈钢	较低的生命周期成本： <ul style="list-style-type: none"> • 与碳钢的设计类似 • 碳钢不锈钢混合钢筋表现良好 • 易于安装，不受做工好坏的影响 • 不需要维护 • 没有寿命限制 • 水泥层可以更薄 • 更好的耐火性 • 100% 回收为优质钢 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 初始成本更高，但如果考虑下列方案，只会高几个百分点 <ul style="list-style-type: none"> ✓ 关键区域选用不锈钢 ✓ 选用节约型双相钢

不锈钢钢筋与其他方案的比较¹⁵⁻²⁰

	优点	缺点
阴极保护	初始成本低? 通常用于修护	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 需要为整体保护进行精心设计 ▪ 为了维持正确的电触点，需要仔细安装 ▪ 需要永久性电源（需要监测与维护），需要监测和更换受损阳极
膜 / 密封胶	初始成本低?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 需要小心安装（气泡） ▪ 不能在任何天气离安装 ▪ 长期的表现值得商榷 ▪ 只限于水平表面

参考资料

1. <http://www.lapresse.ca/actualites/montreal/201111/25/01-4471833-echangeur-turcot-254-millions-pour-lentretien-avant-la-demolition.php>
2. <http://www.ledevoir.com/politique/quebec/336978/echangeur-turcot-quebec-confirme-le-mauvais-etat-des-structures>
3. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education references/Ref07 The use of predictive models in specifying selective use of stainless steel reinforcement.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education%20references/Ref07%20The%20use%20of%20predictive%20models%20in%20specifying%20selective%20use%20of%20stainless%20steel%20reinforcement.pdf)
4. <http://www.nachi.org/visual-inspection-concrete.htm> 混凝土目检
5. <http://www.nickelinstitute.org/en/Sustainability/LifeCycleManagement/LifeCycleAssessments/LCAProgresoPier.aspx>
(普罗格雷索Progreso码头)
6. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education references/Ref08 Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education%20references/Ref08%20Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf)
7. <https://www.roadsbridges.com/willing-bend-0> (俄勒冈)
8. <http://structurae.net/structures/data/index.cfm?id=s0011506> (俄勒冈)
9. <http://www.aeonline.ae/major-hong-kong-stainless-steel-rebar-contract-signed-by-arminox-middle-east-42317/news.html> (香港澳门)
10. <http://www.engineersireland.ie/EngineersIreland/media/SiteMedia/groups/Divisions/civil/Broadmeadow-Estuary-Bridge-Integration-of-Design-and-Construction.pdf?ext=.pdf> (布罗德梅多Broadmeadow)
11. 由优劲特公司提供
12. [http://www.arup.com/Projects/Stonecutters Bridge.aspx](http://www.arup.com/Projects/Stonecutters%20Bridge.aspx) (昂船洲大桥)
13. [https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Stonecutters bridge towers Chinese version.pdf](https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/Structural/Stonecutters%20bridge%20towers%20Chinese%20version.pdf) (昂船洲大桥)
14. [http://www.cif.org/noms/2008/24 - Ocean Parkway Belt Bridge.pdf](http://www.cif.org/noms/2008/24%20-%20Ocean%20Parkway%20Belt%20Bridge.pdf) (纽约市环路大桥)
15. 增强不锈钢: 耐久的选择 (法国) <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-t81>
16. Armaduras de Acero Inoxidable (西班牙)
<http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/59armadurasaceroinoxidable.pdf>
17. www.ukcares.com/downloads/guides/PART7.pdf
18. [http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education references/Ref19 Case study of progreso pier.pdf](http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education%20references/Ref19%20Case%20study%20of%20progreso%20pier.pdf)
19. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Publikasjoner/Prrapp%20405.pdf> (通用)
20. [http://americanarminox.com/Purdue University Report - Stainless Steel Life Cycle Costing.pdf](http://americanarminox.com/Purdue%20University%20Report%20-%20Stainless%20Steel%20Life%20Cycle%20Costing.pdf) (使用不锈钢钢筋的优点)
21. <http://www.stainlesssteelrebar.org>

NEW!

电流耦合参考

1. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore, M. P. Pedefferri以及P. Pedefferri, 钢筋混凝土中的碳钢与不锈钢钢筋的电耦合效应, 国际钢筋混凝土结构的腐蚀与修复会议, 1998年, 佛罗里达州奥兰多。
2. A. Knudsen, EM. Jensen, O. Klinghoffer以及T. Skovsgaard, 通过智能利用不锈钢筋以经济有效的方式提高混凝土结构的耐久性, 国际钢筋混凝土结构腐蚀与修复会议, 1998年, 佛罗里达州奥兰多。
3. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore及M. P. Pedefferri, 化学成分对氯化物污染和碳化混凝土中不锈钢腐蚀行为的影响, 特性与性能, 第三届欧洲不锈钢大会论文集, 1999年, 第三卷, 池亚拉古纳, AIM酒店。
4. O. Klinghoffer, T. Frolund, B. Kofoed, A. Knudsen, EM. Jensen及T. Skovsgaard, 奥体钢AISI 316在混凝土中的应用和经济效益, 混凝土中钢筋的腐蚀: 腐蚀原理和腐蚀保护, 2000年, Mietz, J., Polder, R. 和 Elsener, B., Eds, 伦敦。
5. Knudsen和T. Skovsgaard, 不锈钢加固, 混凝土工程, 2001年, 第5卷(3), 59页。L. Bertolini和 P. Pedefferri, 使用不锈钢改善钢筋混凝土耐久性的实验室与现场经验, 腐蚀评论, 2002年, 第20卷, 129页。
6. [S. Qian](#), [D. Qu](#) & [G. Coates](#) 碳钢与不锈钢间的电耦合, 加拿大冶金季刊, 第45卷, 2006年第4期, 475-483页, 线上发布: 2013年7月18日。
7. J.T. Pérez-Quiroz, J. Teran, M.J. Herrera, M. Martinez, J. Genesca: 混凝土结构修复中对不锈钢钢筋的评估, J. 建设用钢杂志 (2008年) doi:10.1016/j.jcsr.2008.07.024
8. Juliana Lopes Cardoso / Adriana de Araujo / Mayara Stecanella Pacheco / Jose Luis Serra Ribeiro / Zehbour Panossian 海洋环境用不锈钢钢筋: 研究同样混凝土结构中碳钢的电蚀效应 (2018)
[<https://store.nace.org/stainless-steel-rebar-for-marine-environment-a-study-of-galvanic-corrosion-with-carbon-steel-rebar-used-in-the-same-concrete-structure>]. 产品编号: 51318-11312-SG
9. <http://stainlesssteelrebar.org/>

谢谢！

建筑/土木工程发言报告

第7B章

不锈钢扁平材产品的结构应用

不锈钢结构钢 用不锈钢来设计

Barbara Rossi和Maarten Fortan
土工工程系，比利时鲁汶大学

在Nancy Baddoo的初稿基础上完成
钢结构研究协会，英国Ascot公司



大纲

- 结构应用案例
- 机械特点
- 根据欧洲规范3进行设计
- 其他方法
- 挠度
- 其他信息
- 工程师资源



第1部分

结构应用案例



根特圣彼得火车站（比利时）

设计单位：Wefirna

建设单位：THV Van Laere-
Braeckel Aero



布鲁塞尔军校
设计单位：
AR.TE

建设单位：
Tractebel
Development

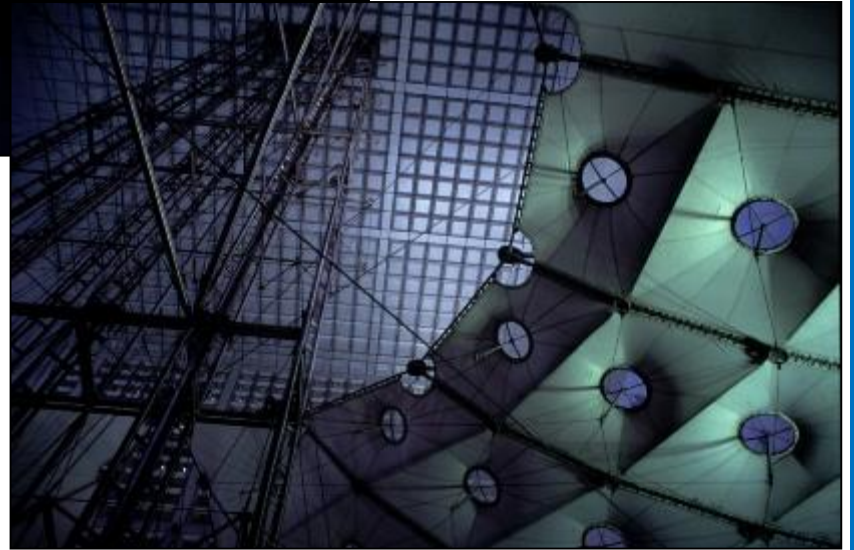




巴黎大拱门

设计单位: Johan Otto
von Spreckelsen

建设单位: Paul Andreu





不锈钢别墅（芬兰）

法国圣拉扎尔透视组 (法国)

设计单位: Arte
Charpentiers &
Associés

建设单位: Mitsu
Edwards



波尔图车站（葡萄牙）



意大利米兰Torno Internazionale S.P.A. 总部
大楼，EN 1.4404

设计单位：Dante O. BENINI 及合伙人建筑公司



图片：Toni Nicolino / Nicola Giacomini

核电厂的不锈钢架



图片：Stainless Structurals LLC

不锈钢外墙支撑，
坦帕（美国）



图片：TriPyramid Structures, Inc.

不锈钢工字梁，
泰晤士河口区水处理工程，（英国）



图片：Interserve

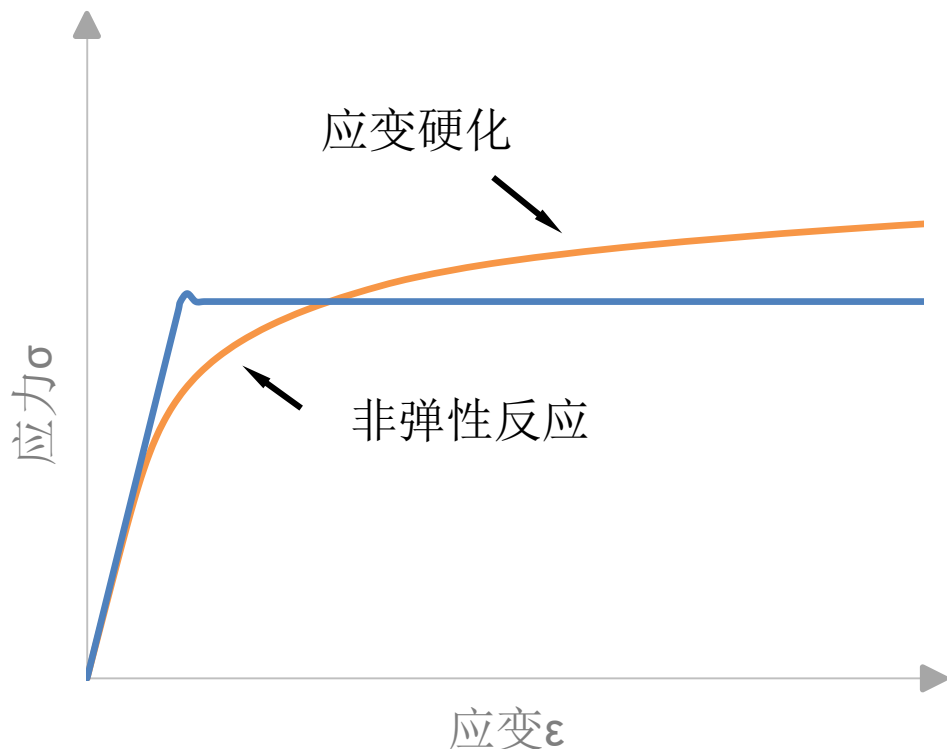


第2部分

材料的机械特性

应力-应变特性 碳钢对比不锈钢

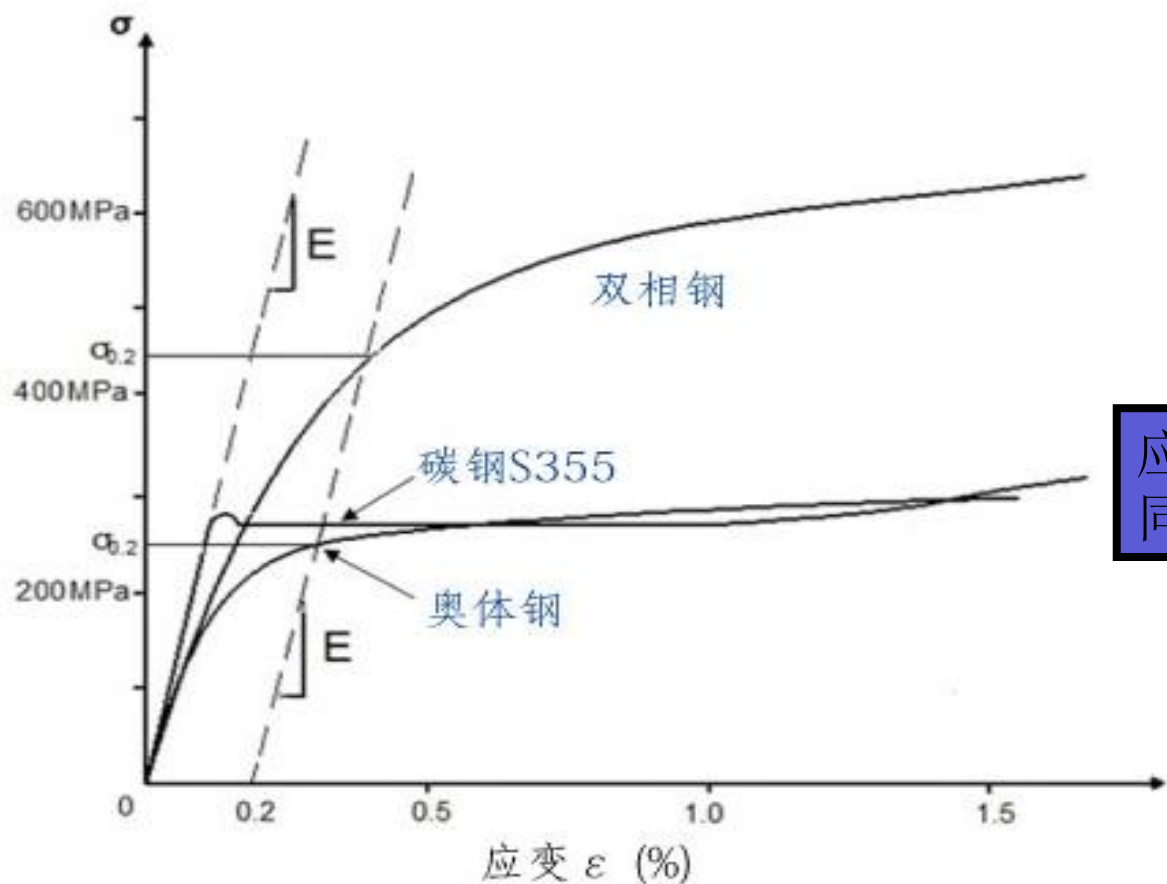
- 不锈钢与碳钢的 $\sigma - \varepsilon$ 特性有着根本性的差异。



碳钢有界定清晰的屈服点和塑性屈服坪

不锈钢点屈服行为是渐进性的，有较高的应变硬化。

应力-应变特性——低应变



应力-应变反应根据不同类别有所不同。

不锈钢的设计强度

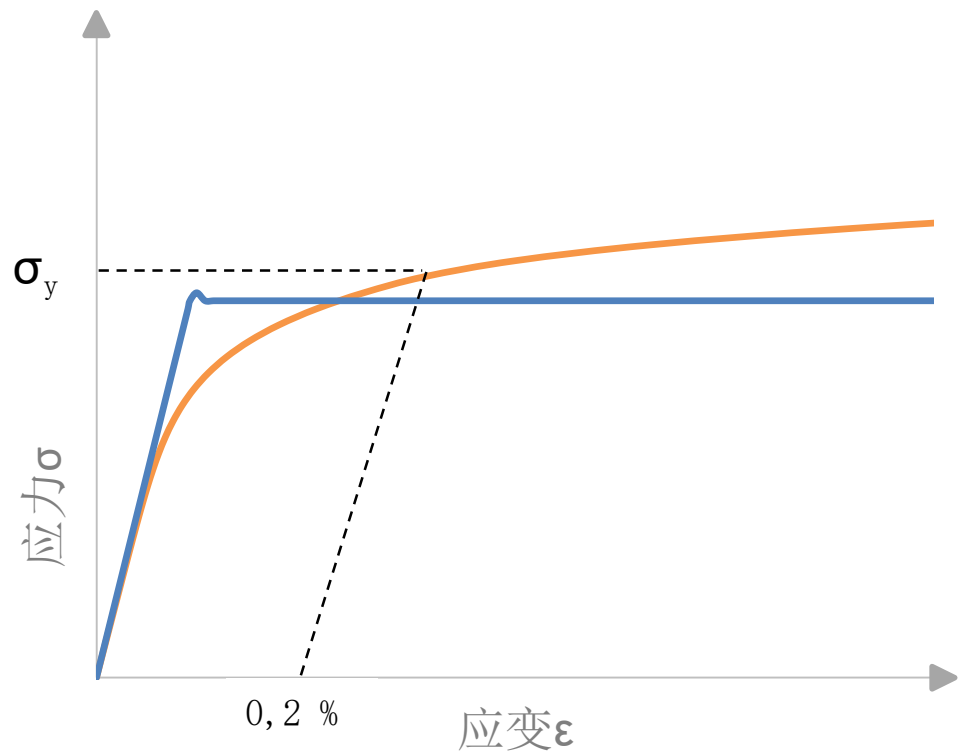
EN 10088-4和-5的最低
保证强度为0.2%

奥体钢: $f_y = 220-350$ MPa

双相钢: $f_y = 400-480$ Mpa

铁素体钢: $f_y = 210-280$ MPa

杨氏模量: $E=200,000$ to $220,000$
MPa



不锈钢的设计强度

等级	类别	屈服强度 (N/mm ²) 0.2% 保证 强度	极限强度 (N/mm ²)	杨氏模量 (N/mm ²)	断裂应变 (%)
1.4301 (304)	奥体钢	210	520	200000	45
1.4401 (316)	奥体钢	220	520	200000	40
1.4062	双相钢	450	650	200000	
1.4462	双相钢	460	640	200000	
1.4003	铁素体	250	450	220000	

应变硬化

（加工硬化或冷加工）

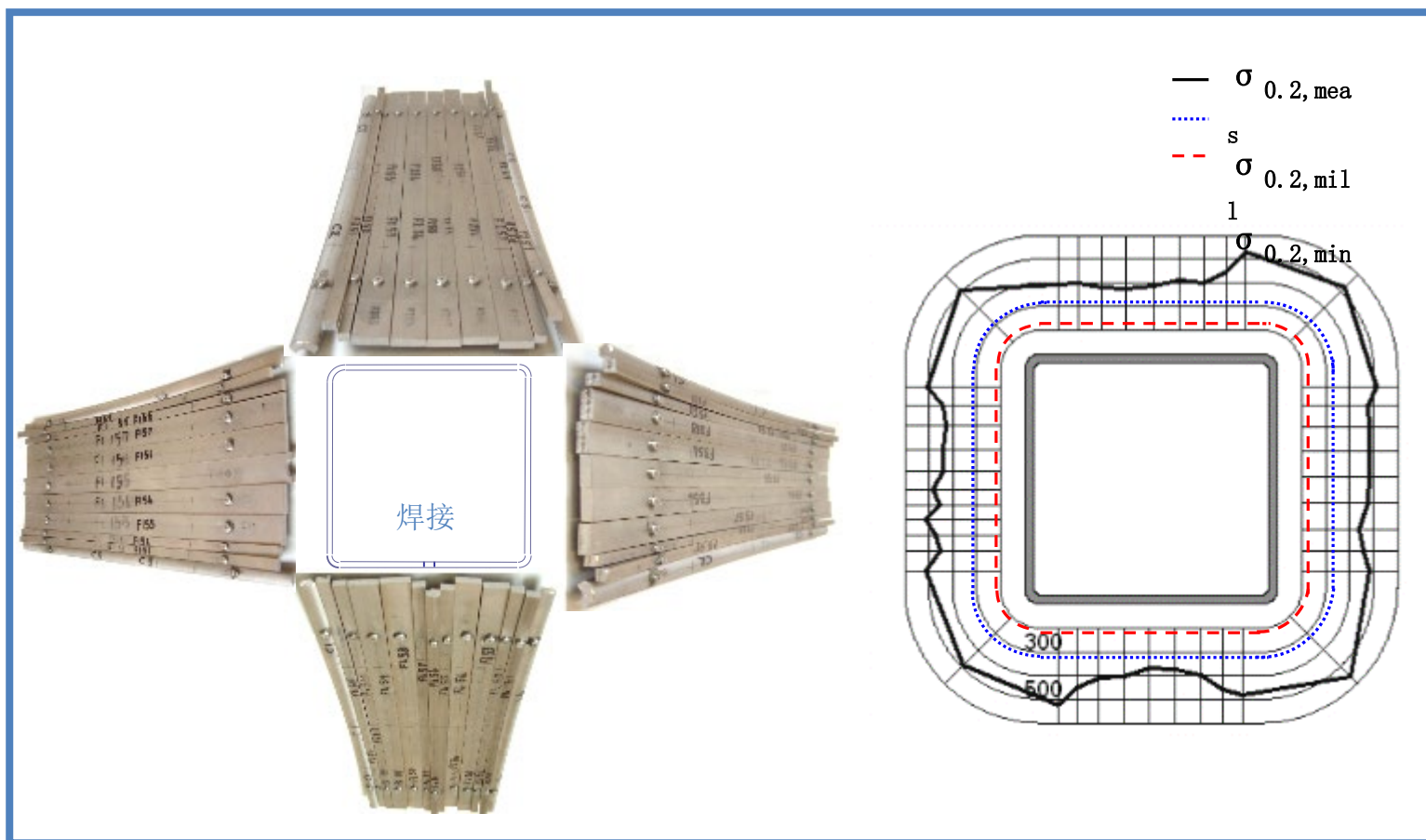
- 通过塑性变形增加强度
- 钢厂钢铁生产操作中，或者在制造工艺中冷成形产生的应变硬化

在生产矩形空心型材的过程中，交叉处冷弯角0.2%的保证强度会提高50%左右！

应变硬化

(加工硬化或冷加工)

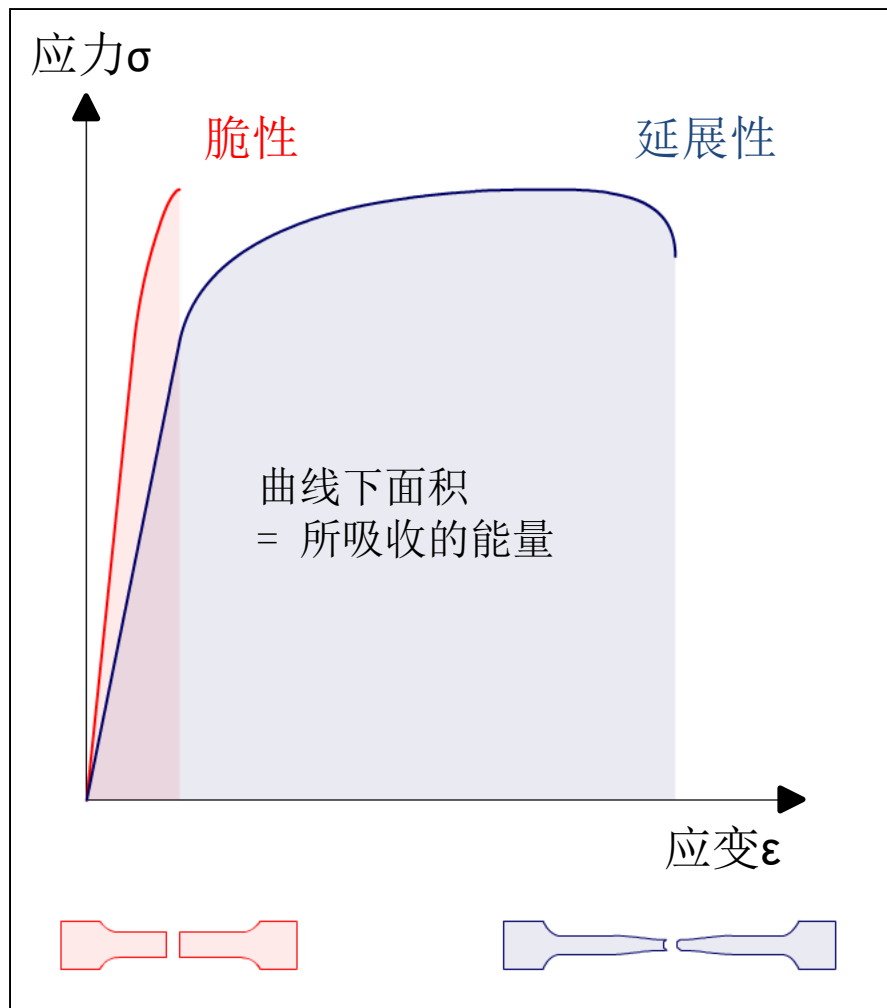
- 在成型过程中强度得以加强



应变硬化——不总是有用

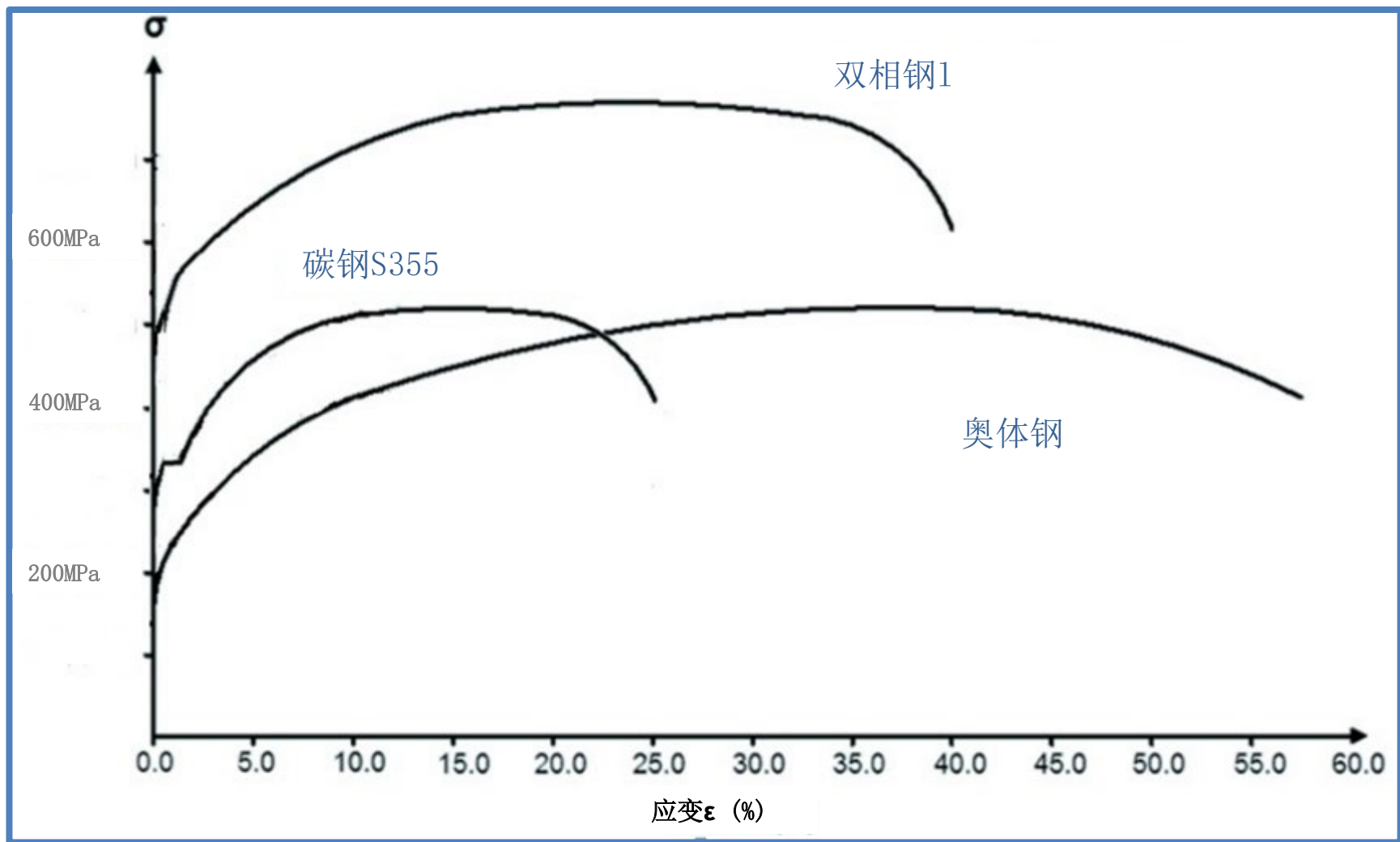
- 更重、功率更大的制造设备
- 需要更大的力
- 延展性减少（但是，初期延展性较高，尤其是奥体钢）
- 可能产生无用的的残余应力

延展性和韧性



- 延展性- 能够延展，但不会破裂的能力
- 韧性- 吸收能量和塑性变形但不会发生折裂的能力

应力-应变特点 - 高应变





爆炸/耐冲击结构



安全护柱



正在生产海洋平台上端的梯形抗暴墙。

应力-应变特点

- 非线性……………会导致
 - 局部压屈的不同限度的宽厚比
 - 受压和弯曲中的不同构件的屈曲行为
 - 更大的挠度

对屈曲性能的影响

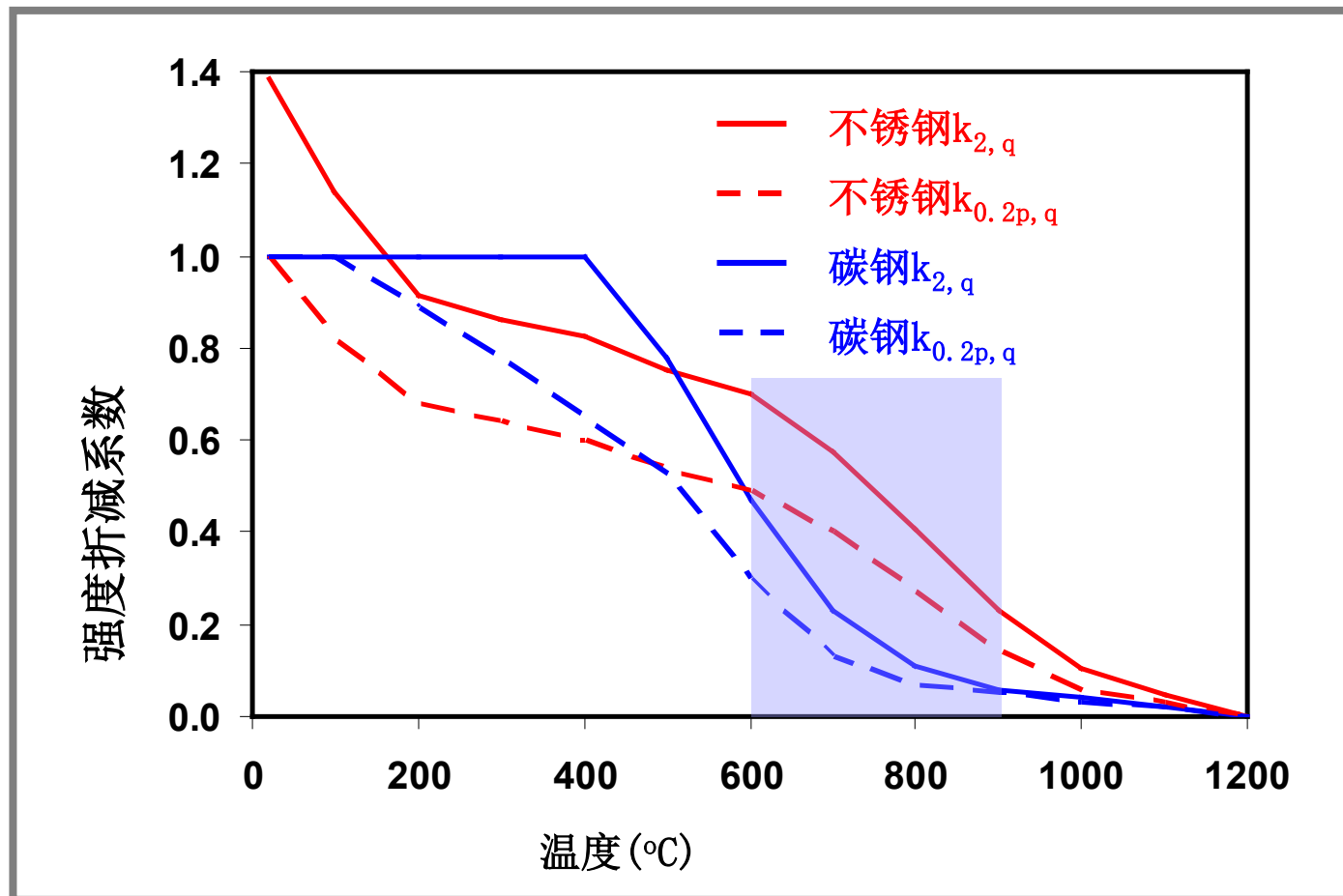
- 低长径比
- 钢柱达到/超过挤压负荷
- - ⇒ 应变硬化的好处很明显
- 不锈钢的性能和碳钢至少一样好

- 高长径比
- 轴向强度低，线性区域应力低
- - ⇒ 在几何与残余应力相似的情况下，不锈钢与碳钢的性能类似

对屈曲性能的影响

- 中等长径比
柱的平均应力在比例极限和0.2%的永久应力之间，
⇒ 不锈钢柱的强度不如碳钢柱的大

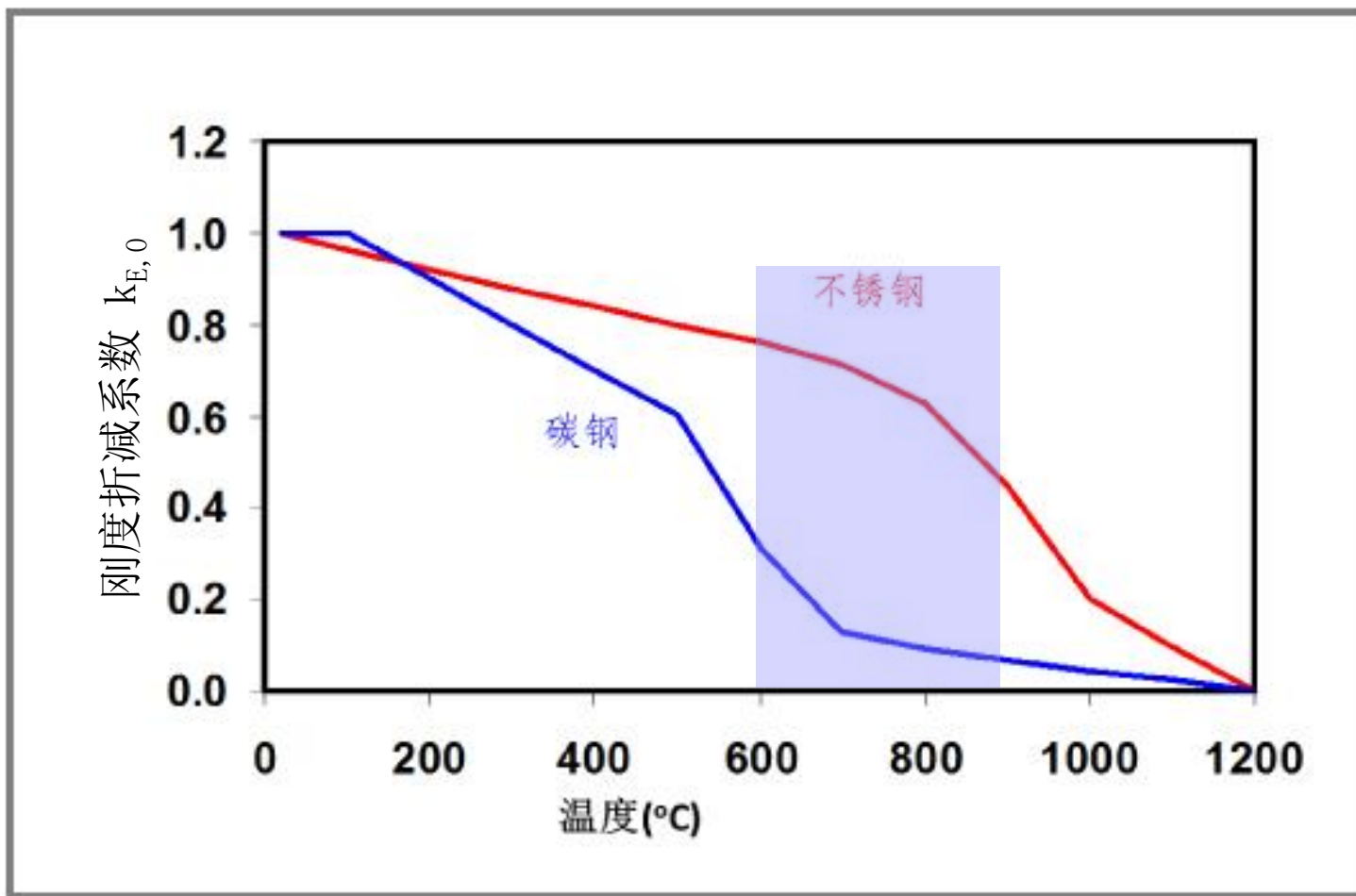
温度升高时的材料



$k_{0.2p,q}$ = 在 0.2% 保证应变时的强度折减系数

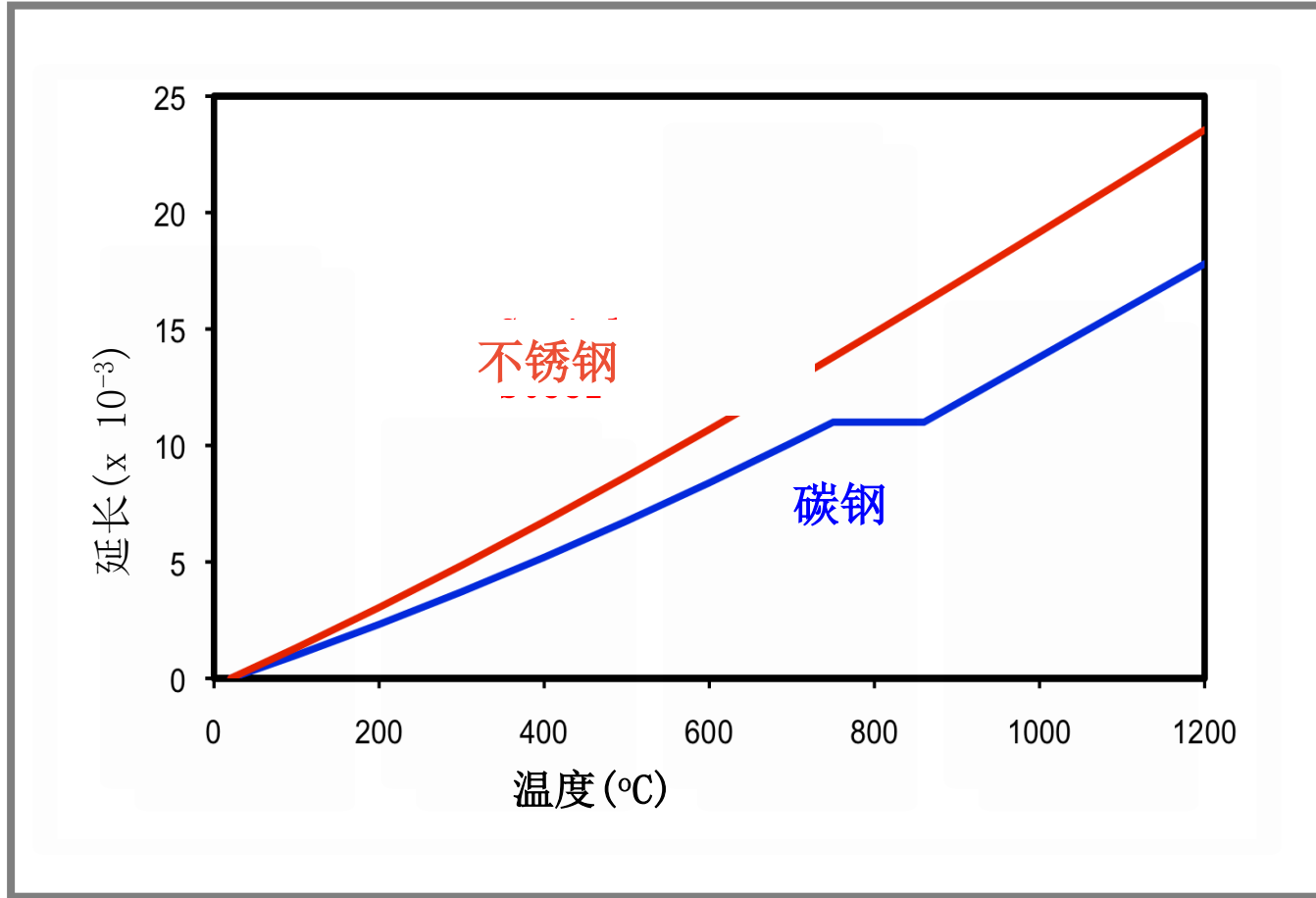
$k_{2,q}$ = 2% 总体应变时的强度折减系数

温度升高时的材料



刚度折减系数

温度升高时的材料



热膨胀

第4部分

按照欧洲建筑规范3进行设计

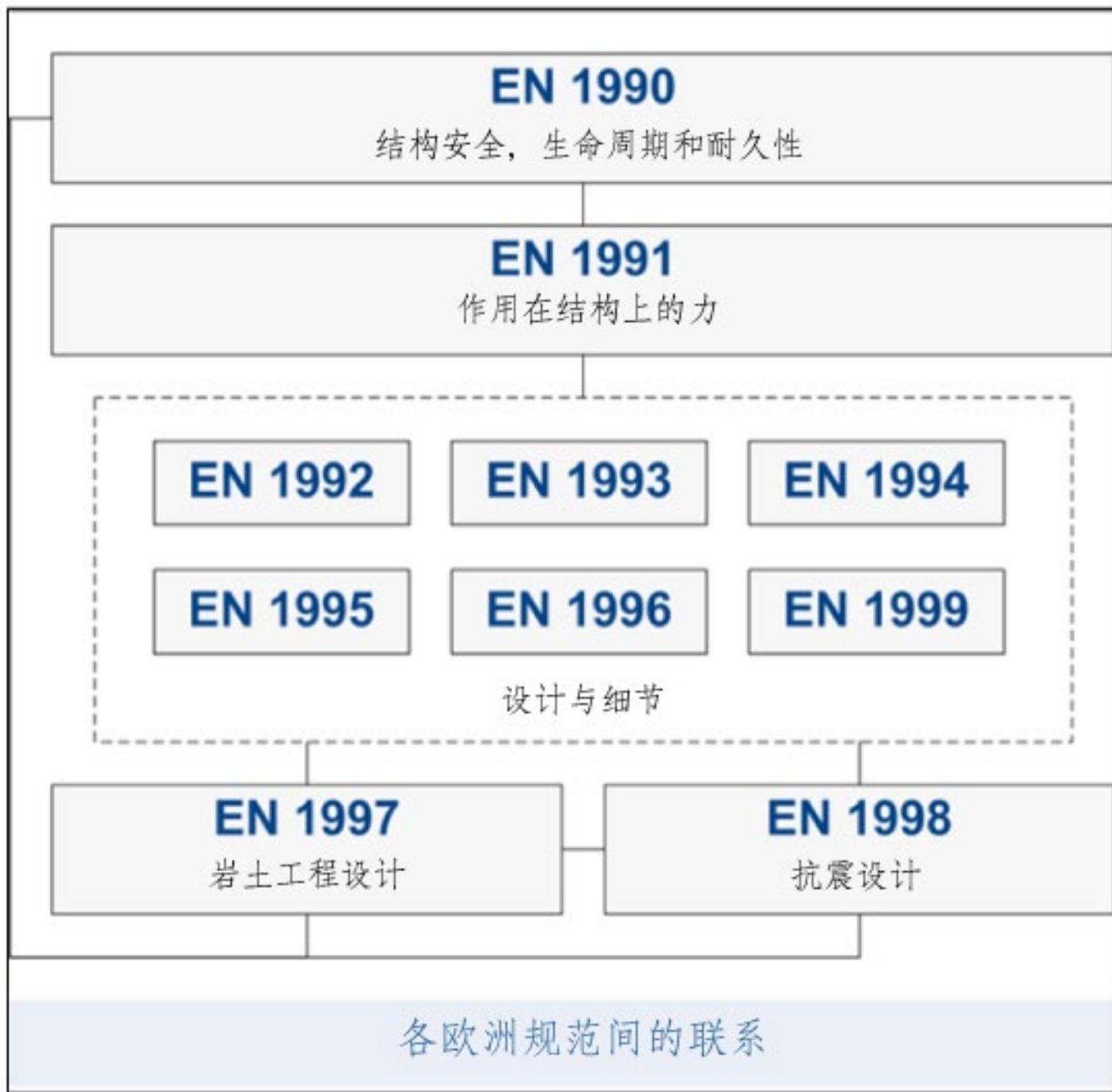


国际设计标准

结构不锈钢有哪些设计标准？



Hamilton Island 游艇聚乐部，澳大利亚



欧洲建筑规范综合了所有常见建筑材料的结构设计规范

欧洲规范3：第1部分 (EN 1993-1)

- EN 1993-1-1 通用规定及建筑规定。
- EN 1993-1-2 结构防火设计。
- EN 1993-1-3 冷弯成型构件及钢板补充规定。
- EN 1993-1-4 不锈钢补充规范。
- EN 1993-1-5 电镀结构部件。
- EN 1993-1-6 壳机构的强度和稳定性。
- EN 1993-1-7 横向荷载的叠板结构构件的强度及稳定。
- EN 1993-1-8 节点设计。
- EN 1993-1-9 不锈钢的疲劳强度。
- EN 1993-1-10 材料的韧性及全厚度属性。
- EN 1993-1-11 受拉构件结构设计。
- EN 1993-1-12 高强度钢的补充规范。

欧洲规范3：钢结构设计， 第1.4部分：不锈钢补充规范

BRITISH STANDARD

BS EN
1993-1-4:2006

Eurocode 3 — Design of steel structures —

Part 1-4: General rules —
Supplementary rules for stainless steels

钢结构的设计。
不锈钢补充规范（2006）

- 欧洲规范3其他部分使用的修订及补充准则
- 适用于建筑、桥梁、储池等。

欧洲规范3——钢结构的设计
第1-4部分：一般规范—不锈钢的补充规范

The European Standard EN 1993-1-4:2006 has the status of a
British Standard

100 61 040 01 01.000.10

BSI
British Standards

NO COPYING WITHOUT BSI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW

欧洲建筑规范3：钢结构设计， 第1.4部分：不锈钢补充规范

- 和碳钢的基本方法相同
- 与碳钢抗拉构件和约束梁有同样规定
- 由于下列原因，型材分类限制、局部屈曲及构件屈曲曲线应用会有所差异：
 - 非线性应力应变曲线
 - 应变硬化特点
 - 残余应力水平的差异

欧洲规范3：钢结构设计， 第1.4部分：不锈钢补充规范

构件类型

- 热轧焊接
- 冷弯成型
- 钢棒

等级的数量

类别	EC3-1-4	未来修改
铁素体	3	3
奥氏体	16	16
双相	2	6

范围

- 构件和连接件
- 耐火（参考EN 1993-1-2）
- 疲劳（参考EN 1993-1-9）

其他设计规范

- 日本——两个规范，一个用于冷弯构件，另一个用于焊接不锈钢构件
- 南非、澳大利亚和新西兰——冷弯不锈钢构件的标准
- 中国——标准正在开发中
- 美国——ASCE冷弯构件规格，AISC热轧和焊接结构钢设计指南

欧洲规范3：钢结构设计， 第1.4部分：不锈钢补充规范

在EN 1993-1-4中给定的不锈钢设计规则是什么，它与碳钢对应物的主要区别是什么？



入口遮阳篷抗爆柱，纽约世贸中心七号大楼

截面类型和局部屈曲

EN 1993-1-4中的表述

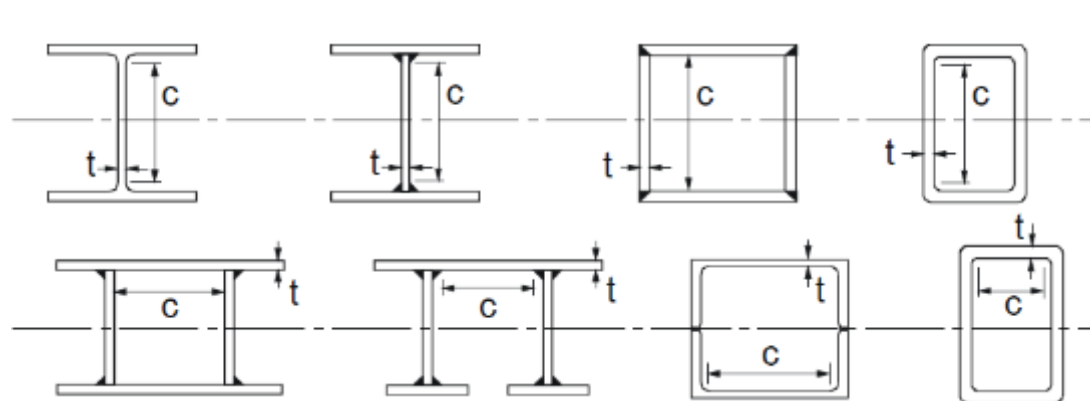
- 宽厚比限值比碳钢的更低
- 细长部件有效宽度的表达式稍有不同

但是…

EN 1993-1-4下一版对限值和有效宽度表达式会更大胆些。

截面分类及EN 1993-1-4局部屈曲表达式

■ 内部压缩部件

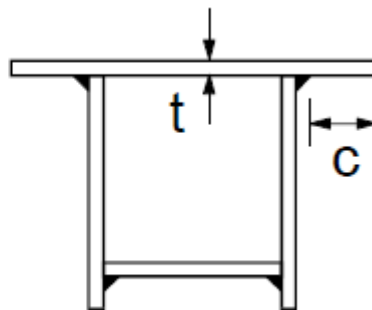
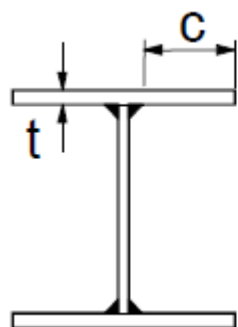
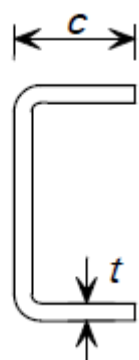


$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

类别	EC3-1-1: 碳钢		EC3-1-4: 不锈钢		EC3-1-4: 未来修订	
	弯曲	压缩	弯曲	压缩	弯曲	压缩
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$c/t \leq 56\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	$c/t \leq 76\varepsilon$	$c/t \leq 35\varepsilon$
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$

截面分类及EN 1993-1-4局部屈曲表达式

■ 外压部件



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

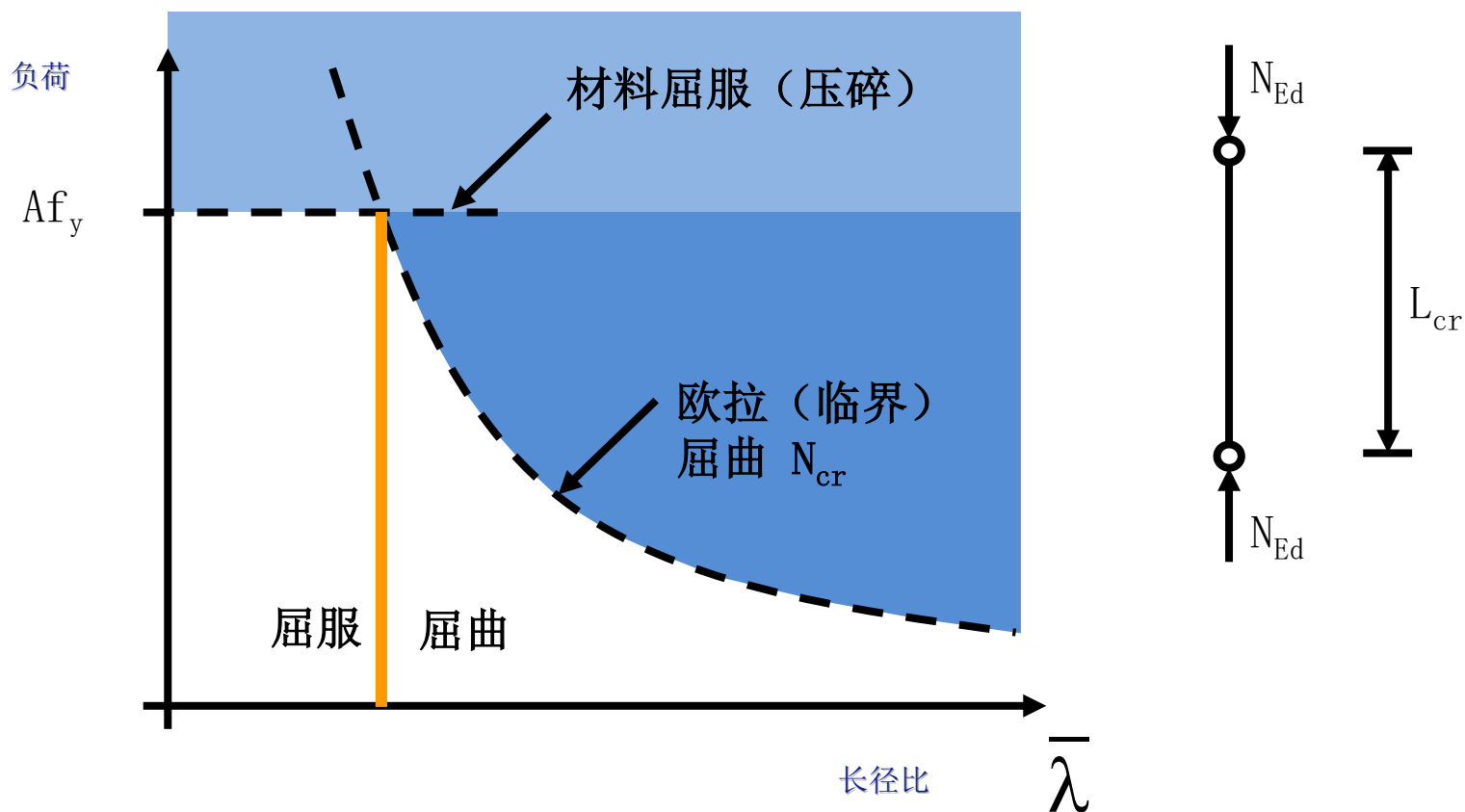
	EC3-1-1: 碳钢	EC3-1-4: 不锈钢		EC3-1-4: 未来修订
类别	压缩	压缩 焊接	压缩 冷弯成型	压缩
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 14\varepsilon$

柱与梁的设计

- 总体上与碳钢使用同样的方法
- 但是柱与LTB却有着不同的屈曲曲线
- 确保对该等级钢使用了正确的 f_y (EN 10088-4 和-5中给定的最低值)

“完美”的钢柱性能

- 两个范畴：屈服和屈曲：



柱的屈曲

- 压力屈抗 $N_{b,Rd}$:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

对1、2、3类横断面

折减系数

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$

对第4类横断面（对称）

柱的屈曲

- 无量纲的长细比：

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad \text{第1、2和3类横断面}$$

$$= \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{第四类横断面}$$

- 根据横断面的总体特点， N_{cr} 是相关屈曲模式的弹性屈曲临界负荷

柱的屈曲

- 折减系数:

$$\chi = \frac{1}{\phi + (\phi^2 - \bar{\lambda}^2)^{0,5}} \leq 1$$

$$\phi = 0,5 (1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_0) + \bar{\lambda}^2)$$

缺陷系数

坪长

柱的屈曲

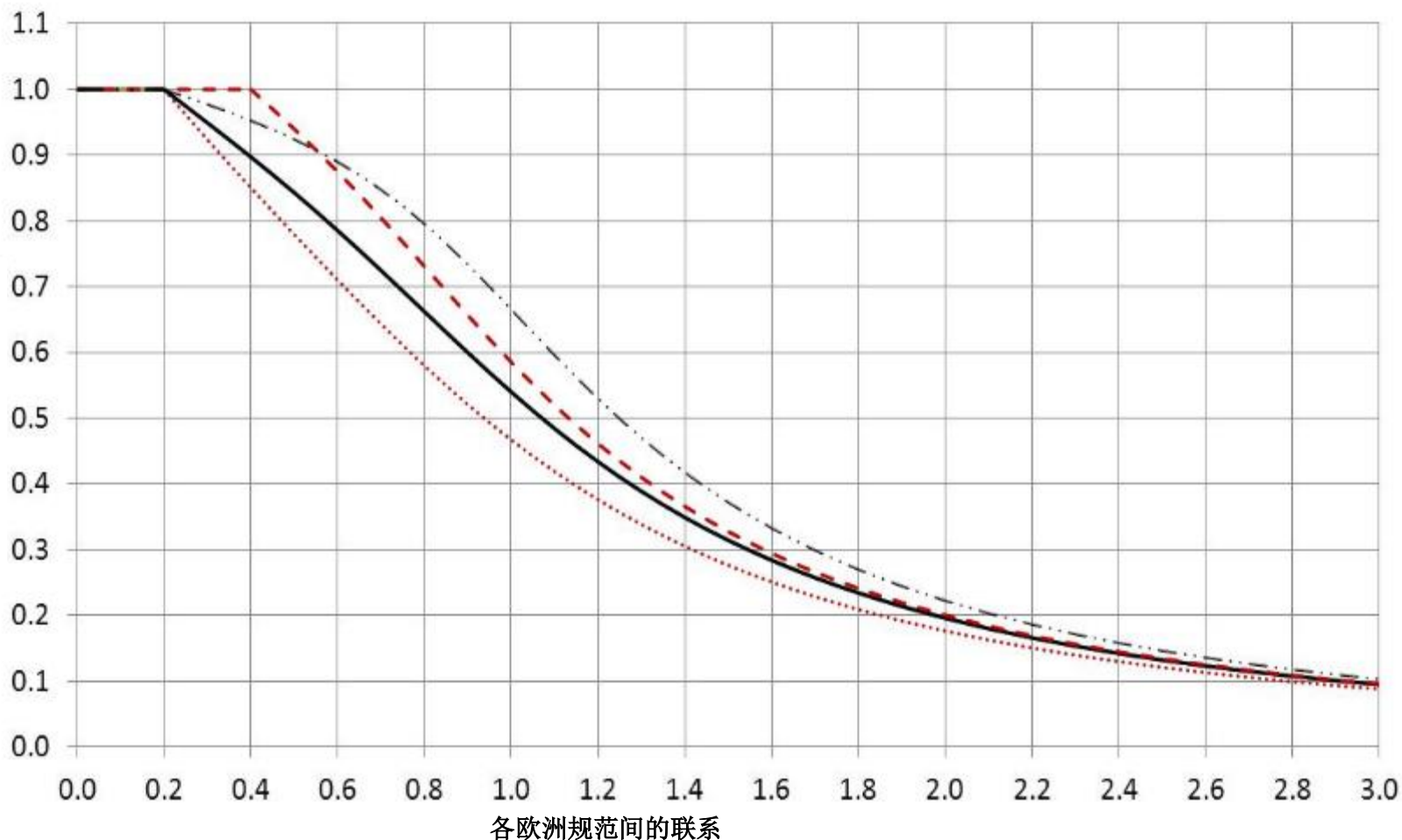
- 根据横断面、生产路径和轴线来选择屈曲曲线：

弯曲屈曲、扭转屈曲和扭转-弯曲屈曲的 α 值和 λ_0 值。

屈曲模式	横梁类型	α	$\bar{\lambda}_0$
弯曲	冷成形开放段	0,49	0,40
	中空截面（焊接、无缝）	0,49	0,40
	焊接开放段（长轴）	0,49	0,20
	焊接开放段（短轴）	0,76	0,20
扭转和扭转-弯曲	所有横梁	0,34	0,20

“节选”自EN 1993-1-4

欧洲规范3 屈曲曲线

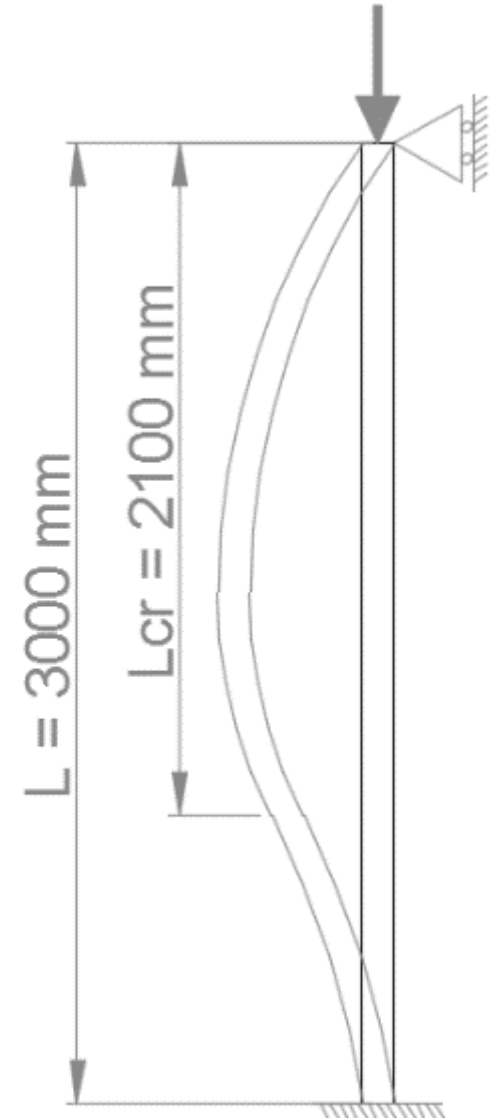
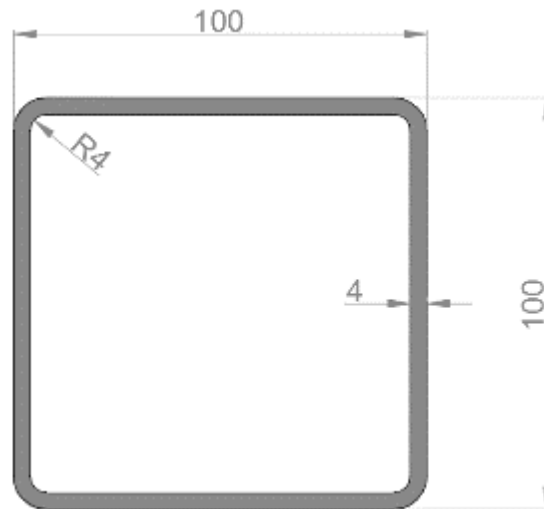


- 不锈钢：空心型材（焊接+无缝焊接），冷弯渠道
- 不锈钢：工字形焊接截面
- 碳钢：工字形焊接截面，冷弯空心型材，冷弯渠道
- .-.- 碳钢：热加工空心型材

欧洲规范3 屈曲示例

- 经过同心压缩的冷弯矩形空心型材

	碳钢	奥氏体不锈钢
材料	S235	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	235	230
E [N/mm ²]	210000	200000



欧洲规范3 屈曲示例

EC 3-1-1: S235

- 分类

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

- 所有内部部件

Class 1

横断面 = 1类

EC 3-1-4: 奥氏体

- 分类

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0,99$$

- 所有内部部件

Class 1

横断面 = 1类

欧洲规范3 屈曲示例

	EC 3-1-1: S235	EC 3-1-4: 奥氏体
A [mm ²]	1495	1495
f_y [N/mm ²]	235	230
γ_{M0} [-]	1	1,1
$N_{c,Rd}$ [kN]	351	313
L_{cr} [mm]	2100	2100
λ_1 [-]	93,9	92,6
$\bar{\lambda}$ [-]	0,575	0,583
α [-]	0,49	0,49
$\bar{\lambda}_0$ [-]	0,2	0,4
ϕ [-]	0,76	0,71
χ [-]	0,80	0,89
γ_{M1} [-]	1	1,1
$N_{b,Rd}$ [kN]	281	277

欧洲规范3 屈曲示例

■ 比较

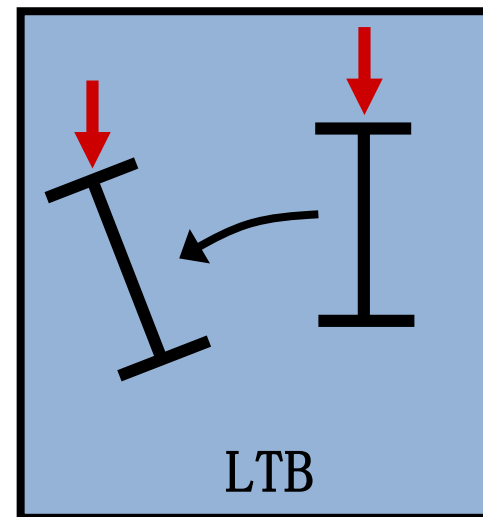
	EC 3-1-1: S235	EC 3-1-4: 奥氏体
f_y [N/mm ²]	235	230
γ_{M0} [-]	1,0	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1
横断面 $N_{c,Rd}$ [kN]	351	313
稳定性 $N_{b,Rd}$ [kN]	281	277

- 本例中，cs 和ss有着相似的屈抗
 ⇒ 应变硬化效果不明显
 EC3 1-4 没有正式解释应变硬化

弯扭屈曲

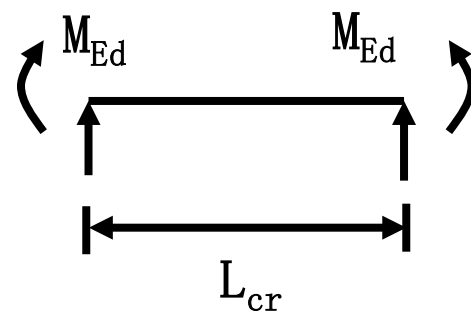
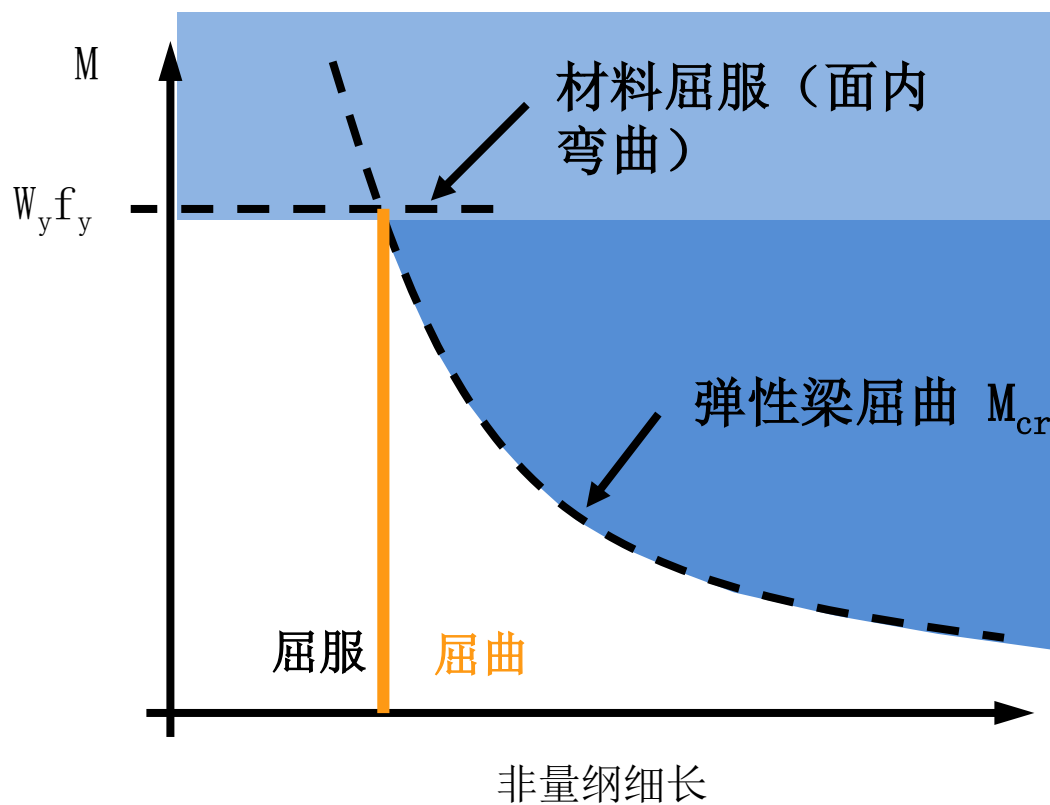
- 出现下列情况时就可以不考虑：

- 短轴弯曲
- CHS, SHS, 圆形或方形杆
- 完全侧向越数量
- $\bar{\lambda}_{LT} < 0.4$



横向扭转屈曲

- 横向扭转屈曲的设计方法类似于钢柱的屈曲处理



$$\bar{\lambda}_{LT}$$

横向扭转屈曲

- 横向自由梁（或梁段）的设计抗弯阻力 $M_{b,Rd}$ 应为：

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

LTB的折减系数

横向扭转屈曲

- 下面为横向扭转屈曲曲线：

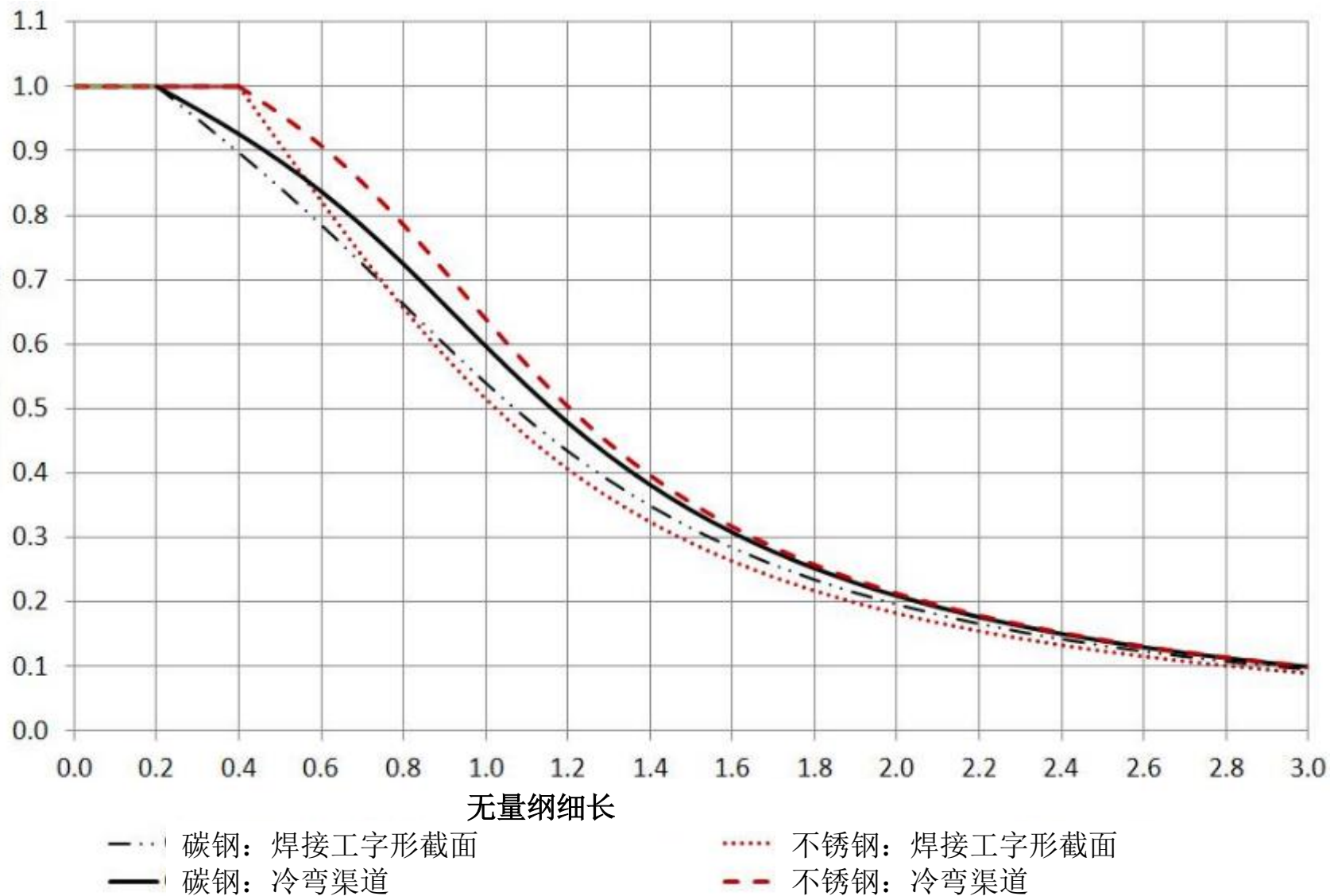
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{but } \chi_{LT} \leq 1.0$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

缺陷系数

坪长

欧洲规范3 横向扭转屈曲曲线



无量纲细长

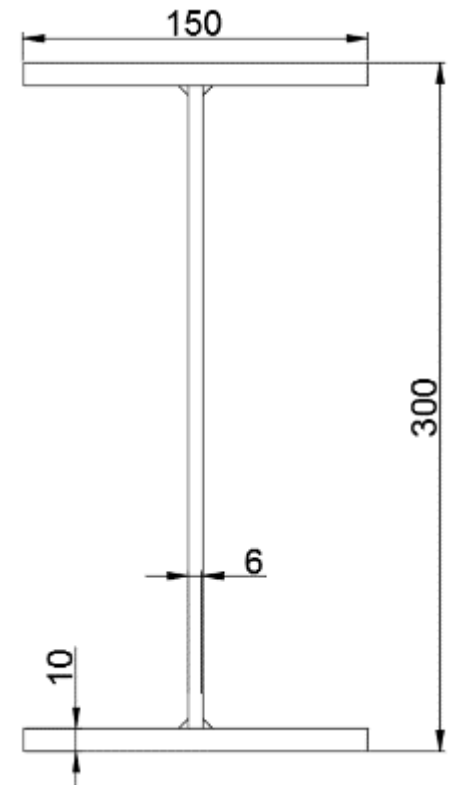
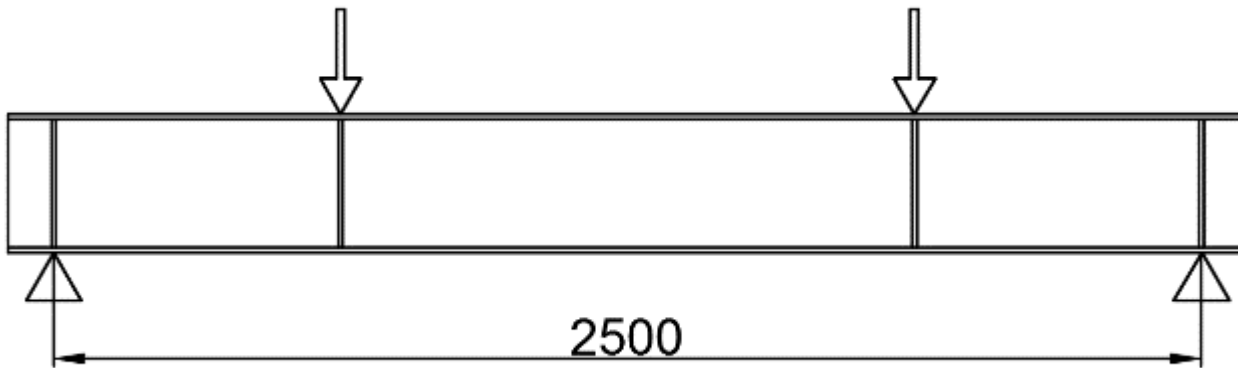
- 横向扭转屈曲细长比：

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

- 压缩屈曲曲线（不包括 a_0 曲线）
- W_y 的值取决于梁段的类别
- M_{cr} 是弹性临界横向扭转屈曲矢量

欧洲规范3 横向扭转屈曲范例

- 受到4点弯曲的工字梁



	碳钢	双向不锈钢
材料	S355	EN 1.4162
f_y [N/mm ²]	355	450
E [N/mm ²]	210000	200000

欧洲规范3 横向扭转屈曲示例

EC 3-1-1: S355

- 分类

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,81$$

- 法兰

类别1

- Web

类别1

横断面 = 类别1

EC 3-1-4: 双相钢

- 分类

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0,71$$

- 法兰

类别3

- Web

类别3

横断面 = 类别3

欧洲规范3 横向扭转屈曲示例

EC 3-1-1: S355

- 极限弯矩
 - 类别1

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 196 \text{ kNm}$$

EC 3-1-4: 双相钢

- 极限弯矩
 - 类别3

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 202 \text{ kNm}$$

修订EC 3-1-4:

- 分类极限: 接近碳钢1
 - 横断面 = 类别2

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 226 \text{ kNm}$$

欧洲规范3 横向扭转屈曲示例

- 弹性临界屈曲力矩:

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: 双相钢
C_1 [-]	1,04	1,04
C_2 [-]	0,42	0,42
k_z [-]	1	1
k_w [-]	1	1
z_g [mm]	160	160
I_z [mm ⁴]	$5,6 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$
I_T [mm ⁴]	$1,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
I_w [mm ⁶]	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
E [MPa]	210000	200000
G [MPa]	81000	77000
M_{cr} [kNm]	215	205

欧洲规范3 横向扭转屈曲示例

■ 横向扭转屈抗

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: 双相钢	EC 3-1-4: 未来修订
W_y [mm ³]	5, 5. 10 ⁵	4, 9. 10 ⁵	5, 5. 10 ⁵
f_y [N/mm ²]	355	450	450
M_{cr} [kNm]	215	205	205
$\bar{\lambda}_{LT}$ [-]	0, 96	1, 04	1, 10
α_{LT} [-]	0, 49	0, 76	0, 76
$\bar{\lambda}_{LT,0}$ [-]	0, 2	0, 4	0, 4
ϕ_{LT} [-]	1, 14	1, 29	1, 37
χ_{LT} [-]	0, 57	0, 49	0, 46
γ_{M1} [-]	1, 0	1, 1	1, 1
$M_{b, Rd}$ [kNm]	111	99	103

欧洲规范3 横向扭转屈曲示例

■ 比较

	EC 3-1-1: S355	EC 3-1-4: 双相钢	EC 3-1-4: 未来修订
f_y [N/mm ²]	355	450	450
γ_{M0} [-]	1, 0	1, 1	1, 1
γ_{M1} [-]	1, 0	1, 1	1, 1
横断面 $M_{c, Rd}$	196	202	226
稳定性 $M_{b, Rd}$	111	99	103

- 在本例中，cs 和ss表现出相似的横向扭转屈抗
- 但是：目前的测试及文献表明，EC3-1-4的结果需要调整，以便更接近现实
 - ⇒ 非常保守
 - （在有限元方法的示例中有所描述）

第4部分

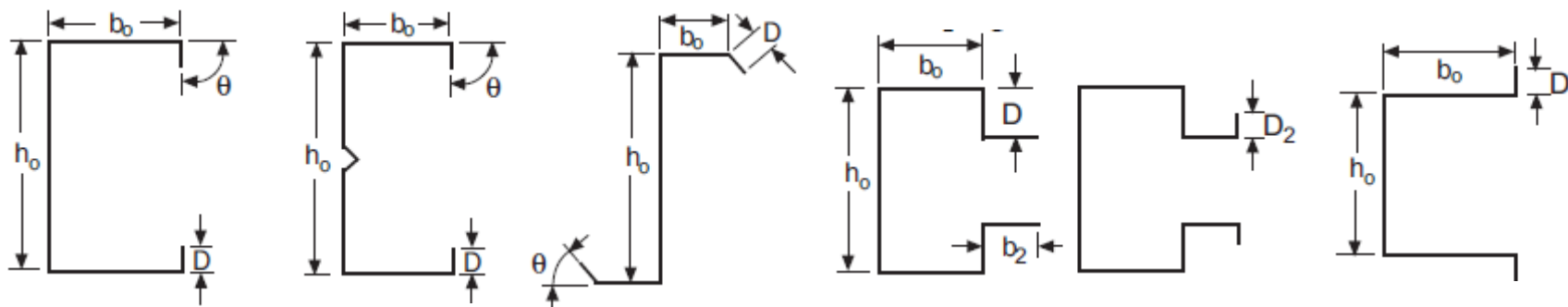
其他方法

其他方法

- 直接强度法（DSM）
 - 美国规范的一部分
 - 针对薄壁型材
- 连续强度法（CSM）
 - 包括应变硬化的好处和效应
- 有限元方法
 - 更加细化
 - 可以包括模型所有的具体情况

直接强度法

- 在AISI 附件1中
- 非常简单直接的方法
- 用于薄壁截面：



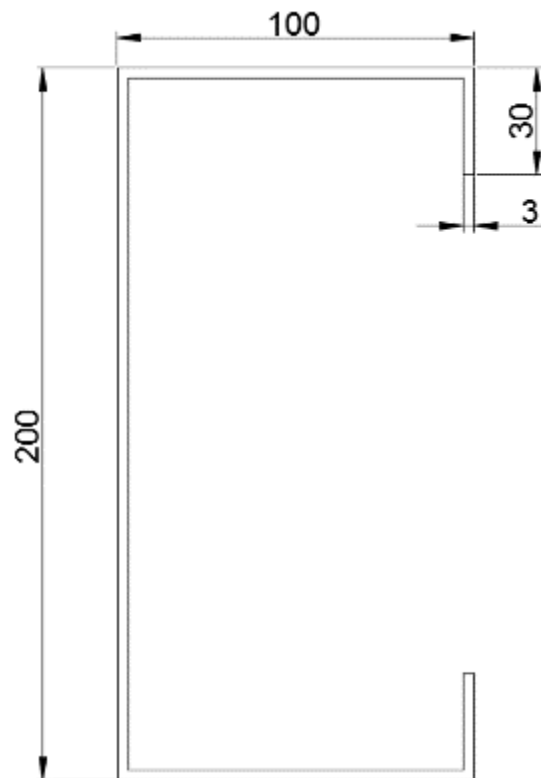
- 需要“弹性屈曲分析”
 - 文献中提供了理论方法
 - 有线条法（例如 CUFSM）
- 更多资料请参考：<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

直接强度法——案例

■ 受压卷边槽钢柱

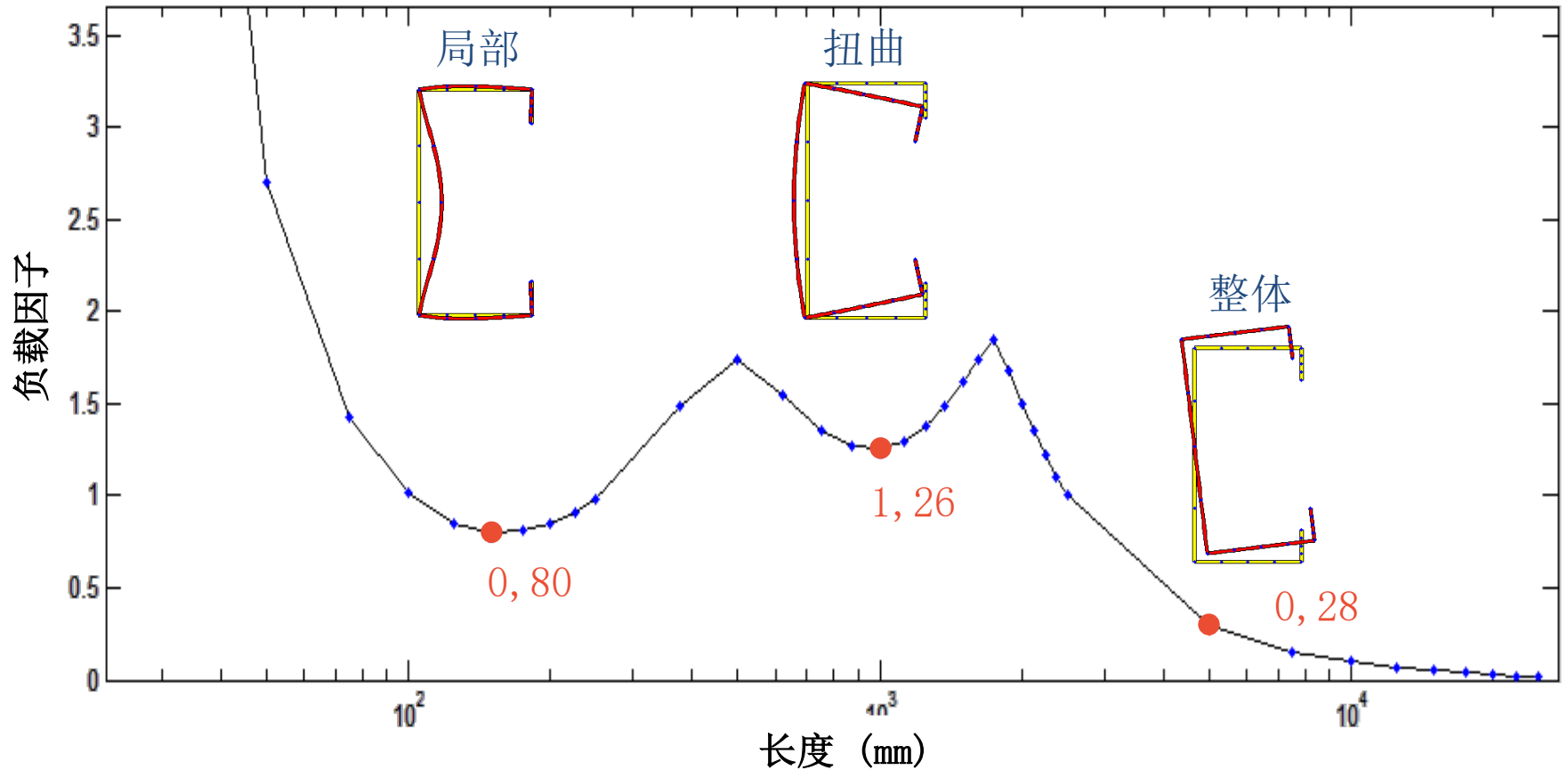
- 简支柱
- 柱长：5米

	铁素体不锈钢
材料	EN 1.4003
f_y [N/mm ²]	280
f_u [N/mm ²]	450
E [N/mm ²]	220000



直接强度法 - 示例

- 第一步：‘弹性屈曲分析’



直接强度法——示例

- 分析的结果 = “弹性临界屈曲负荷”
 - 在案例中，弹性屈曲分析的负载因子等于：
 - 局部屈曲：0, 80
 - 扭曲屈曲：1, 26
 - 整体屈曲：0, 28

- 第二步：额定强度的计算
 - 局部屈曲 \Rightarrow 一个方程
 - 扭曲屈曲 \Rightarrow 一个方程
 - 整体屈曲 \Rightarrow 一个方程

直接强度法——示例

- 额定整体屈曲强度 P_{ne}
 - $\lambda_c = \sqrt{P_y/P_{cre}} = 1,88$
 - $P_y = Af_y = 376 \text{ kN}$
 - $P_{cre} = 0,28 * 376 = 107 \text{ kN}$

$$\text{当 } \lambda_c \leq 1,5 \quad P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y$$

$$\text{当 } \lambda_c > 1,5 \quad P_{ne} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) P_y$$

- $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

直接强度法——示例

- 额定局部屈曲强度 P_{nl}

- $\lambda_l = \sqrt{P_{ne}/P_{crl}} = 0,56$

- $P_{crl} = 0,80 * 376 = 302 \text{ kN}$

当 $\lambda_l \leq 0,776$

$$P_{nl} = P_{ne}$$

当 $\lambda_l > 0,776$

$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}$$

- $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$

直接强度法——示例

- 额定扭转屈曲强度 P_{nd}

- $\lambda_d = \sqrt{P_y/P_{crd}} = 0,89$

- $P_{crd} = 1,26 * 376 = 473 \text{ kN}$

当 $\lambda_d \leq 0,561$

$$P_{nd} = P_y$$

当 $\lambda_d > 0,561$

$$P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y$$

- $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$

直接强度法——示例

- 第三步：轴向阻力“正”是三个额定强度的最小值

- 局部： $P_{n1} = 93,81 \text{ kN}$
- 扭曲： $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$
- 整体： $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

$$\Rightarrow P_n = 93,81 \text{ kN}$$

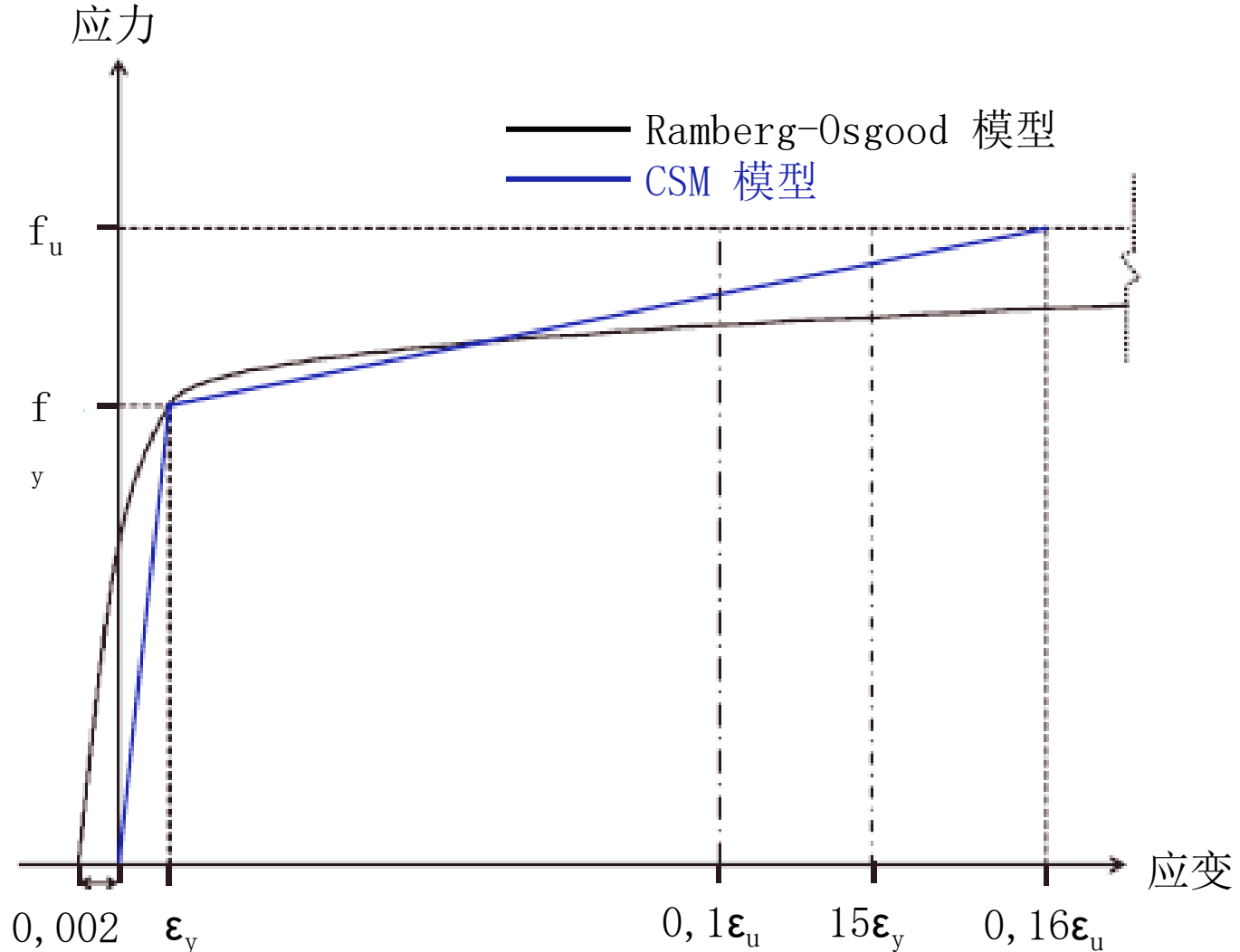
连续强度法

- 不锈钢材料的特点：
 - 非线性材料模型
 - 高应变硬化
 - 传统的设计方法无法考虑横断面的全部潜力

连续强度法使用了包括应变硬化的材料模型

连续强度法

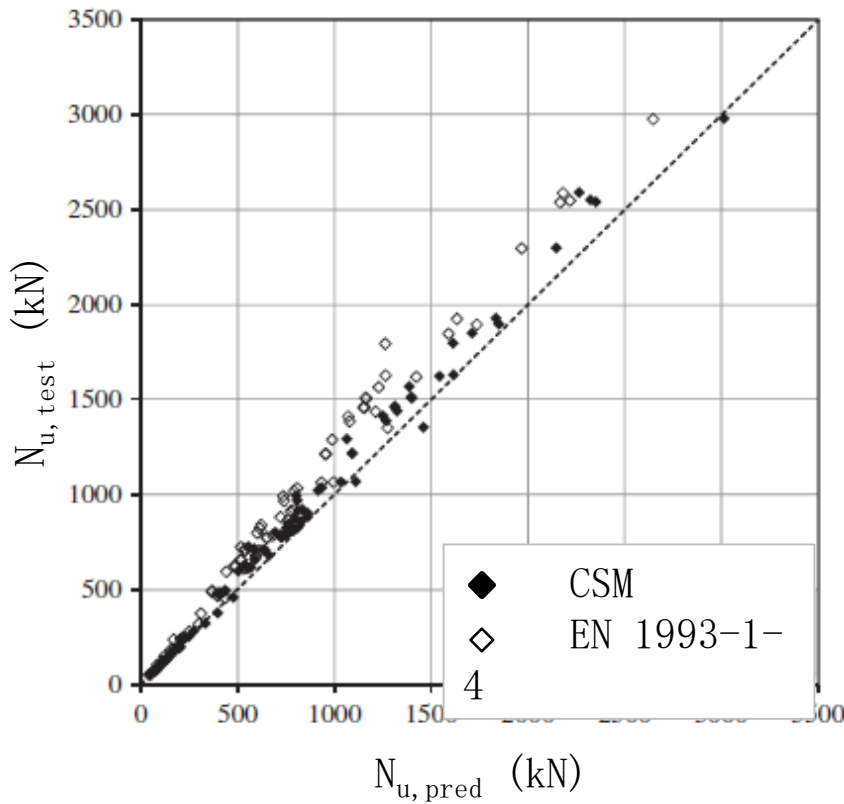
- CSM中考虑的材料模型



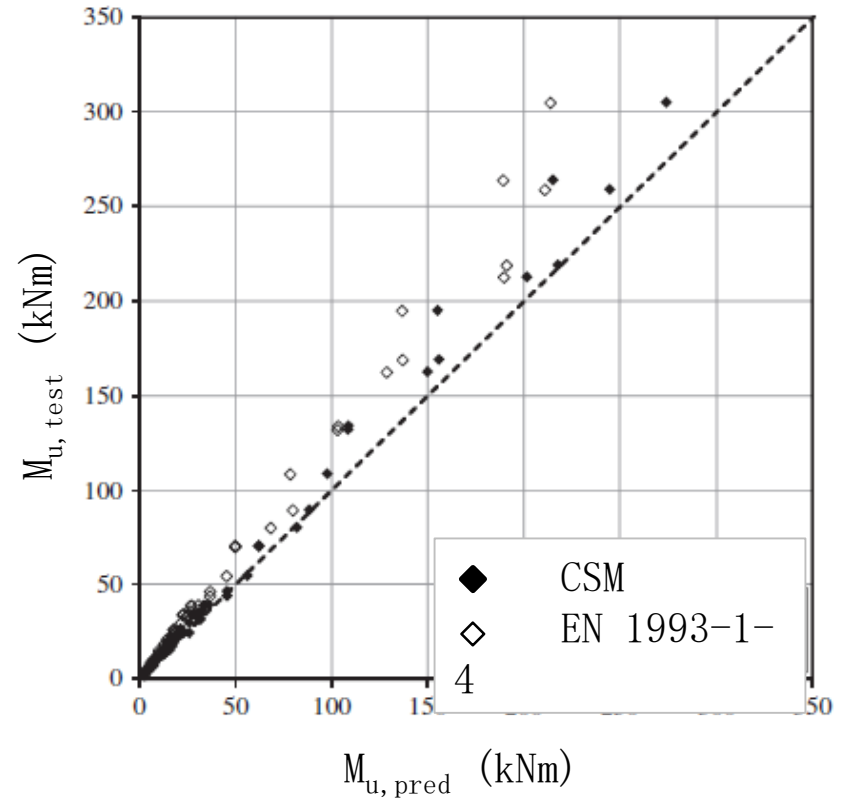
连续强度法

- 比较EC3 和CSM预测和测试结果：

压缩



弯曲

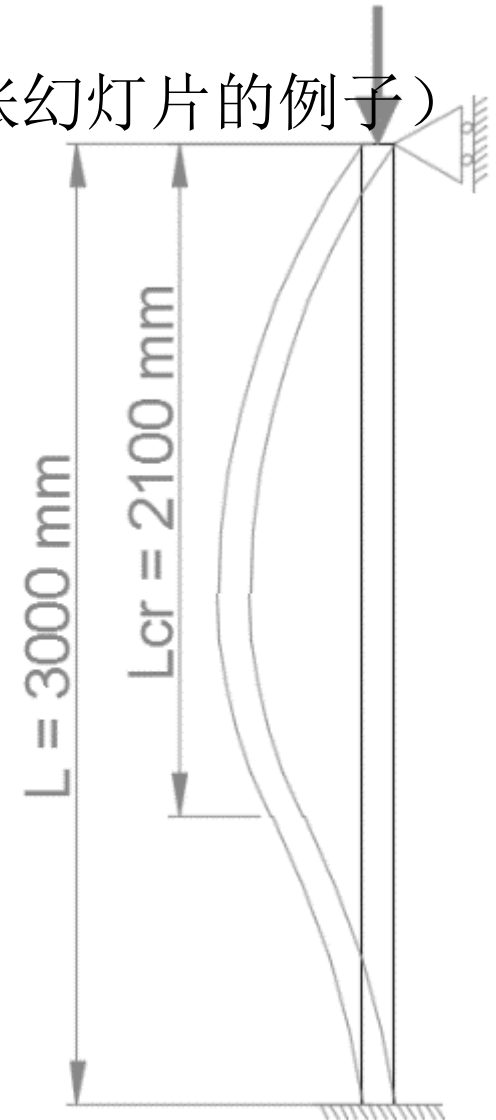
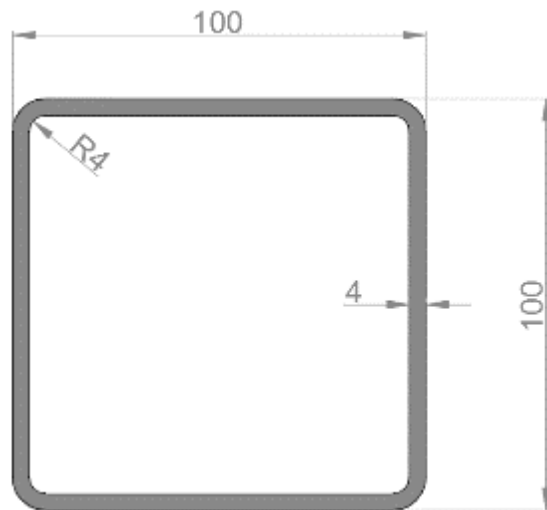


CSM能够精确捕捉横断面的行为

CSM：弯曲扭曲示例

- 受同心压缩的冷弯矩形空心截面（第51张幻灯片的例子）

奥氏体不锈钢	
材料	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	230
E [N/mm ²]	200000



CSM: 弯曲屈曲示例

$$f_y = 230 \text{ N/mm}^2$$

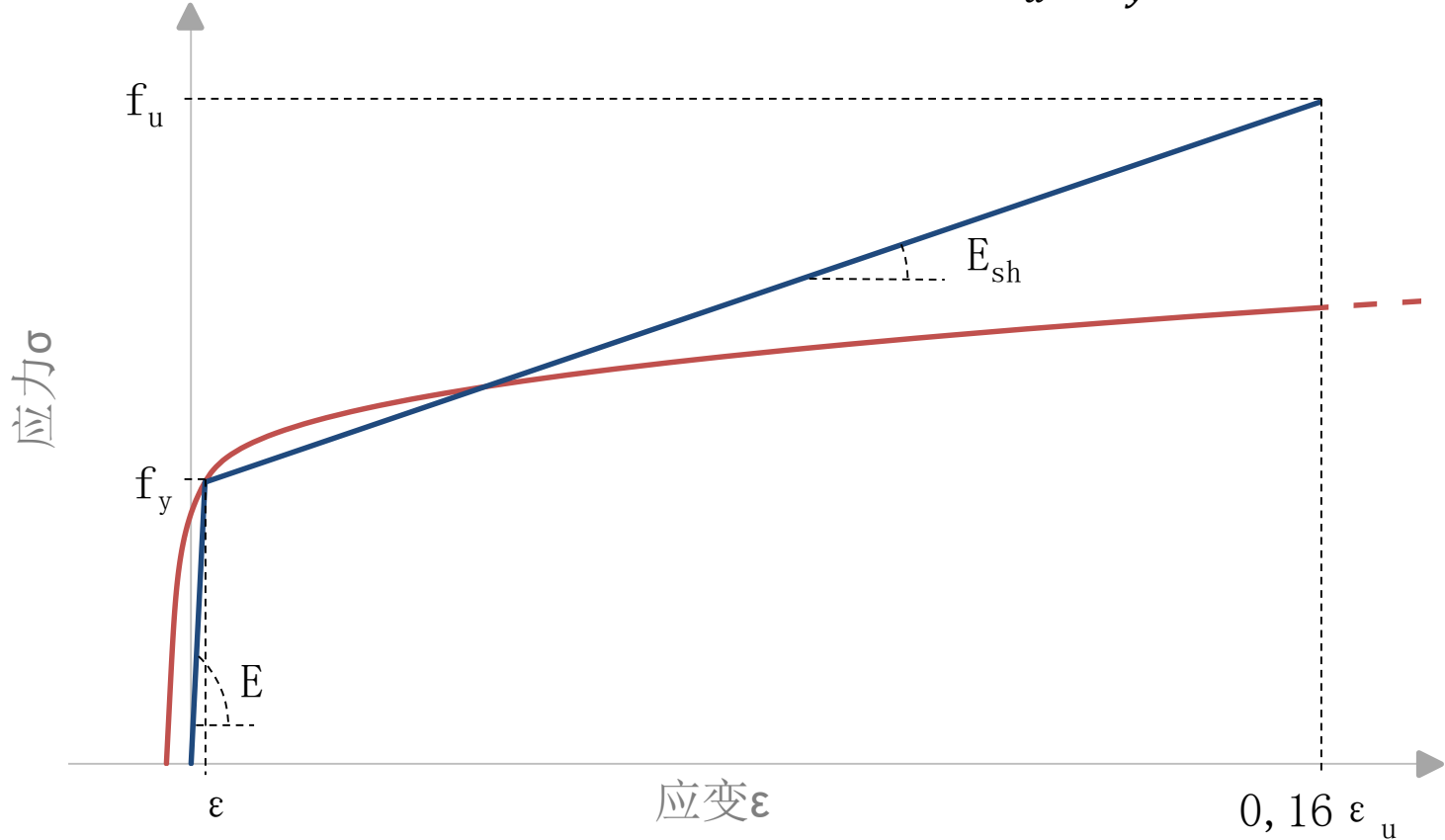
$$f_u = 540 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$0,16\varepsilon_u = 0,16(1 - f_y/f_u) = 0,0919$$

$$\varepsilon_y = f_y/E = 0,0012$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = 3418 \text{ N/mm}^2$$



CSM: 弯曲屈曲示例

$$f_y = 230 \text{ N/mm}^2$$

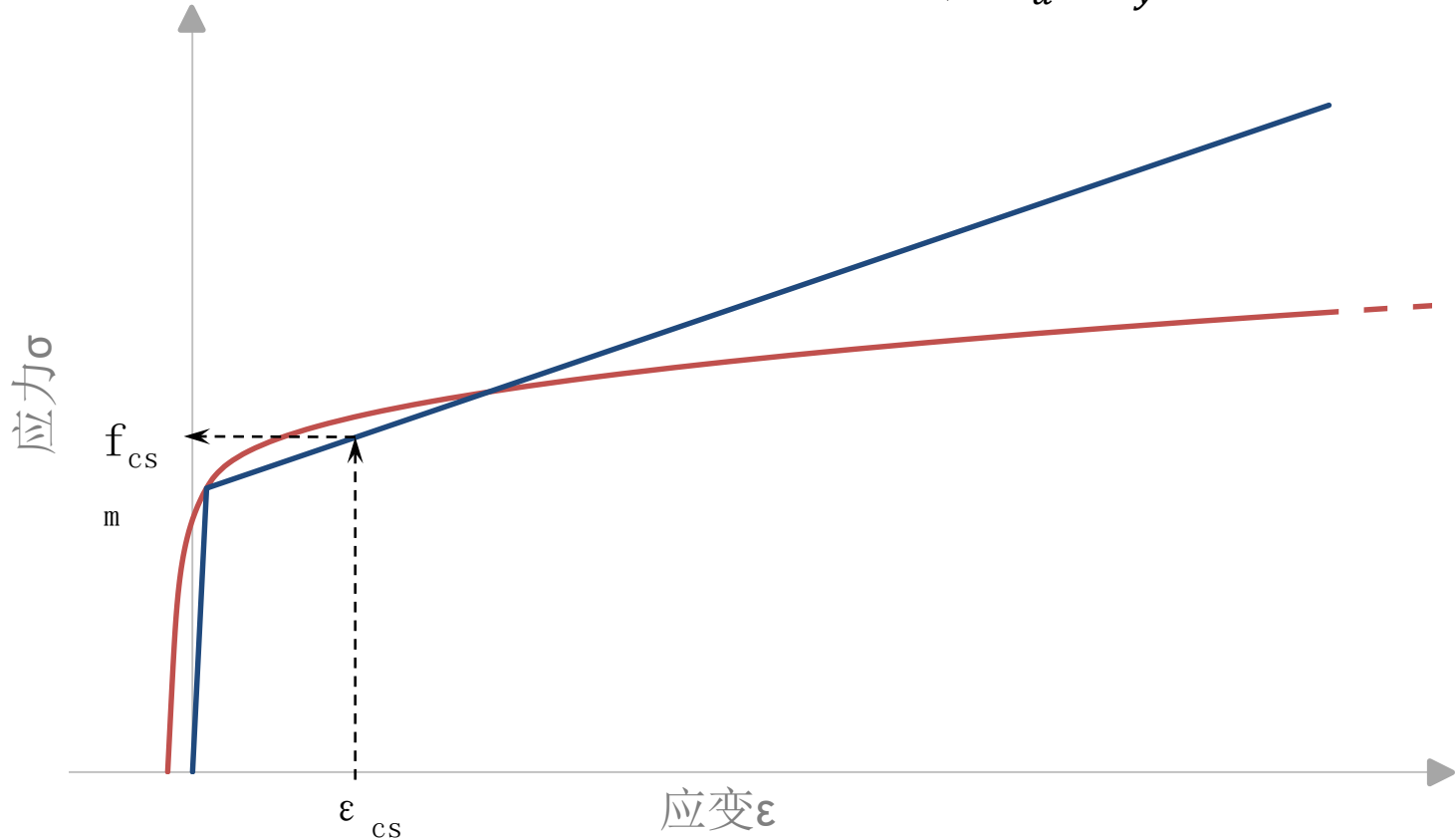
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_y = f_y / E = 0,0012$$

$$f_u = 540 \text{ N/mm}^2$$

$$0,16\varepsilon_u = 0,16(1 - f_y/f_u) = 0,0919$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0,16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = 3418 \text{ N/mm}^2$$



CSM: 弯曲屈曲

- $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,cs}}} = 0,60$

– $\sigma_{cr,cs}$ = 允许元互相作用的全横断面的弹性屈曲应力

- $\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0,25}{\bar{\lambda}_p^{3,6}} = 5,27$

- $f_{csm} = f_y + E_{sh} \varepsilon_y \left(\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} - 1 \right) = 247 \text{ N/mm}^2$

- $N_{c,Rd} = \frac{A f_{csm}}{\gamma_{M0}} = 335 \text{ kN}$

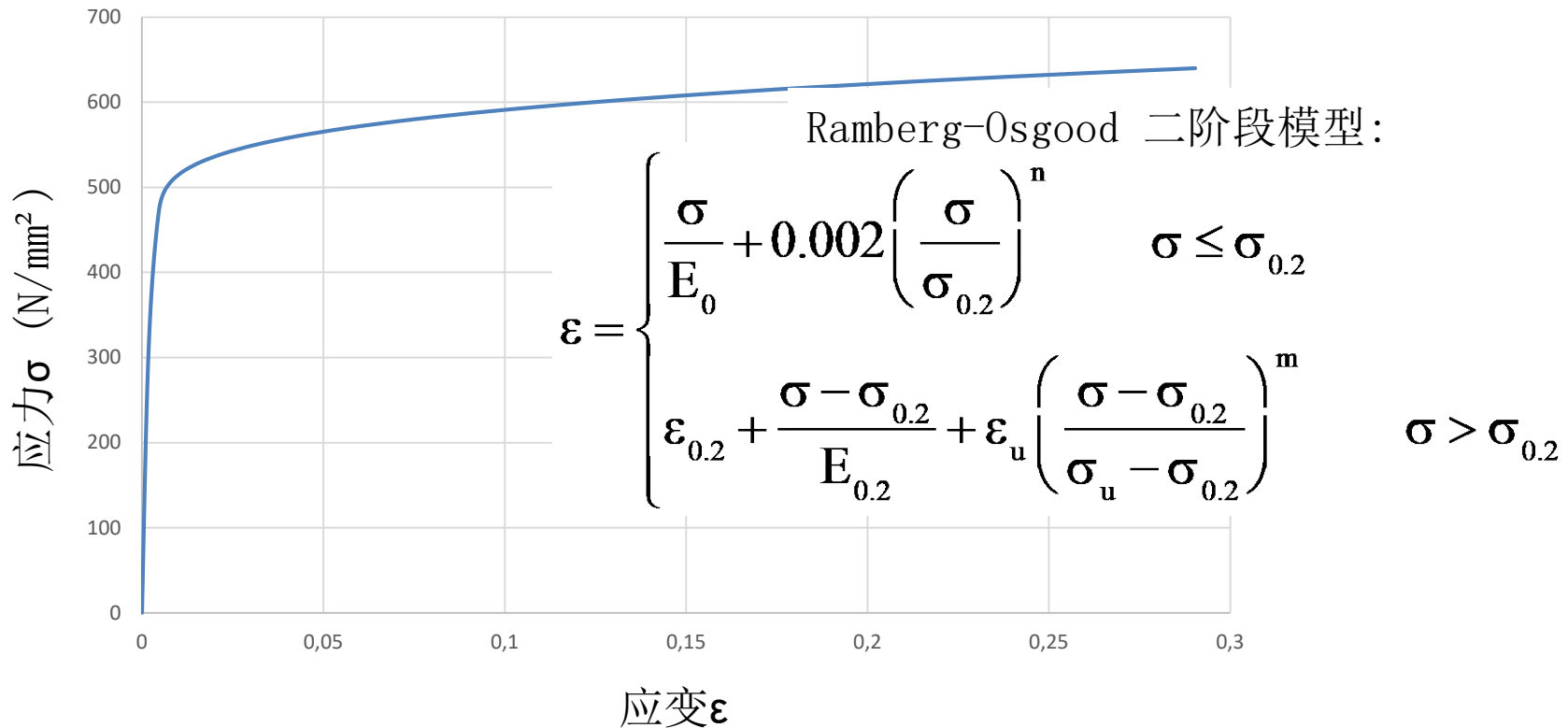
CSM：弯曲屈曲示例

- $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_{csm}}{N_{cr}}} = 0,60$
- $N_{b,Rd} = \chi \frac{Af_{csm}}{\gamma_{M1}} = 294 \text{ kN}$

	EC 3-1-1: S235	CSM: 奥氏体	EC 3-1-4: 奥氏体
f_y [N/mm ²]	235	230	230
γ_{M0} [-]	1,0	1,1	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
横断面 $N_{c,Rd}$ [kN]	351	335	313
稳定性 $N_{b,Rd}$ [kN]	281	294	277

有限元模型

- 材料的应力-应变曲线可以被精确建模（例如通过使用 Ramberg-Osgood 材料规律或“真正”的拉伸测试结果）



有限元模型

- 下面的表达式给出了非线性参数（根据拉斯穆森的修订）：

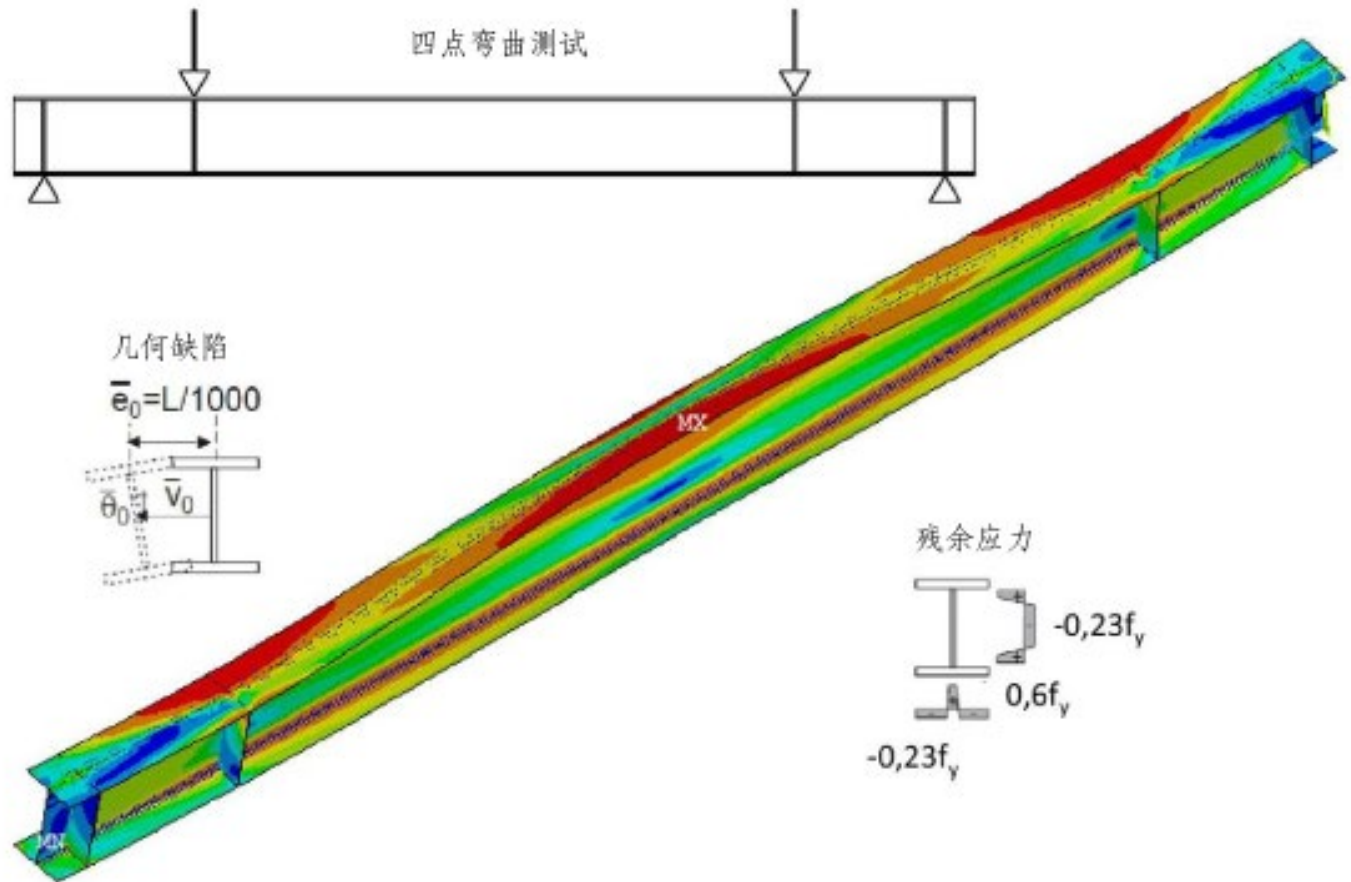
$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)} \quad m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \quad E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n \frac{E_0}{\sigma_{0.2}}}$$

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u}$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = \begin{cases} \frac{0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}}{1 - 0.0375(n - 5)} & \text{奥体钢和双相钢} \\ \frac{0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}}{1 - 0.0375(n - 5)} & \text{所有不锈钢合金} \end{cases}$$

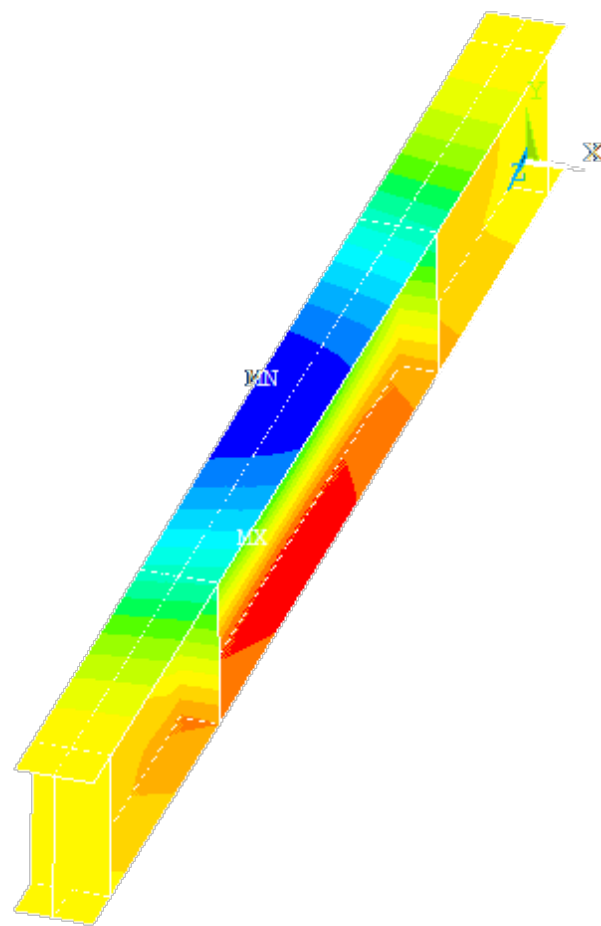
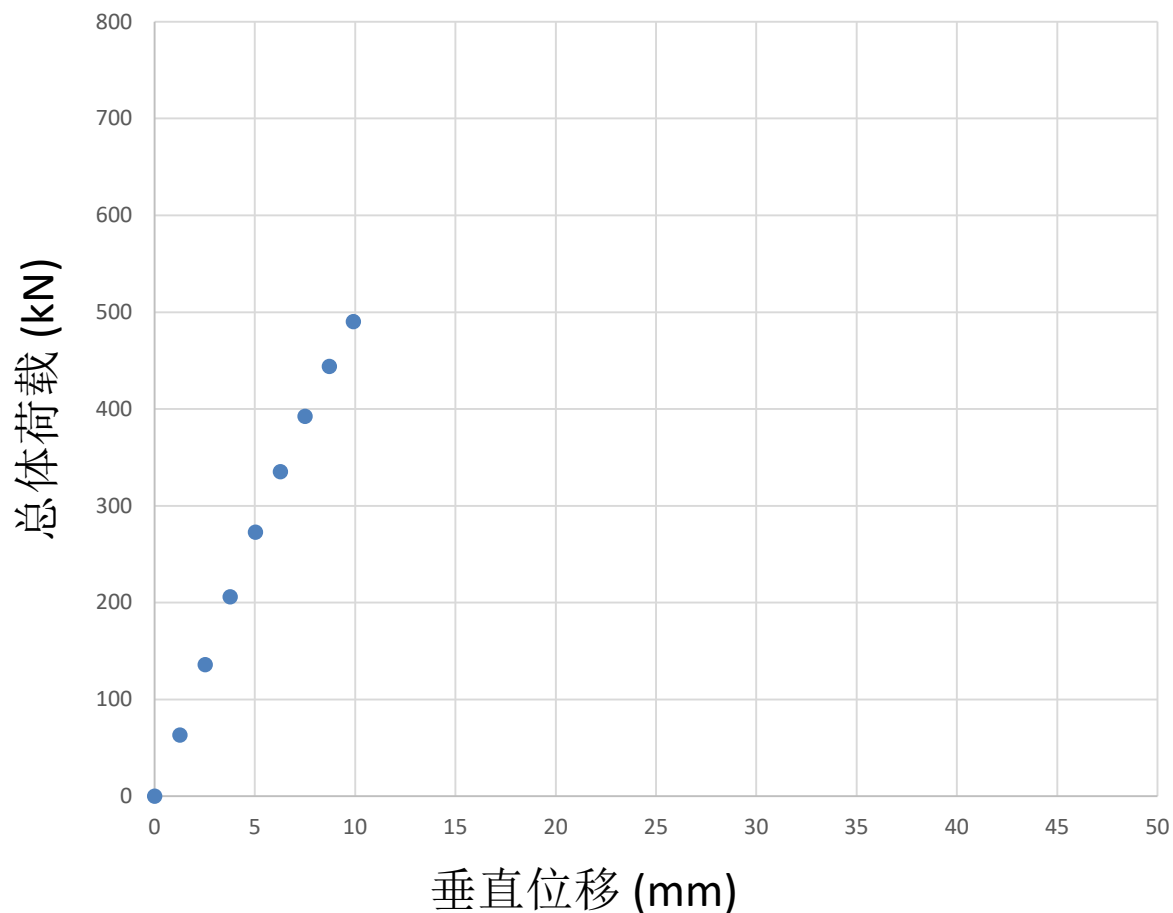
有限元模型

- 弯曲的工字梁受到横向扭曲屈曲： 所有缺陷都可以建模
- : 横向扭曲屈曲



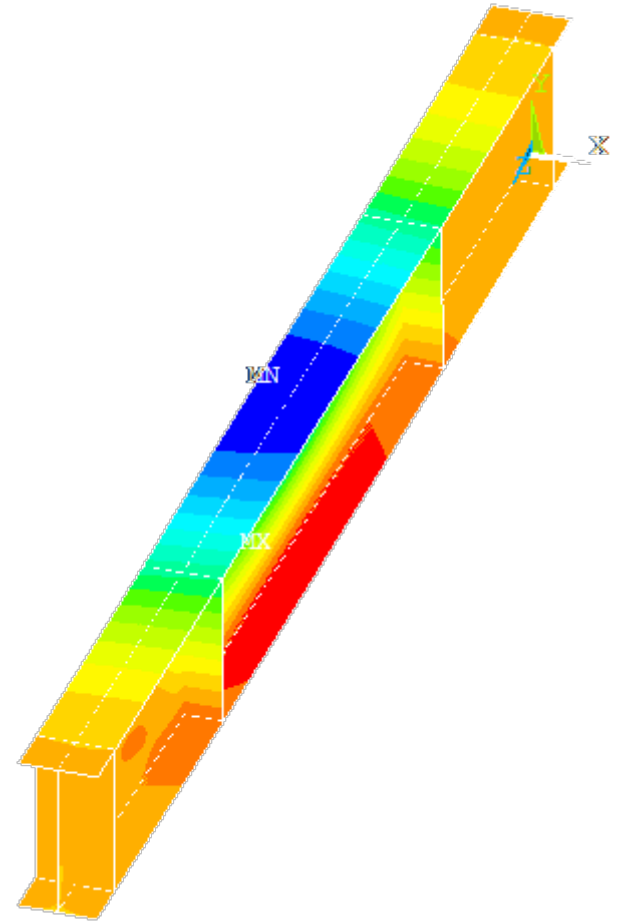
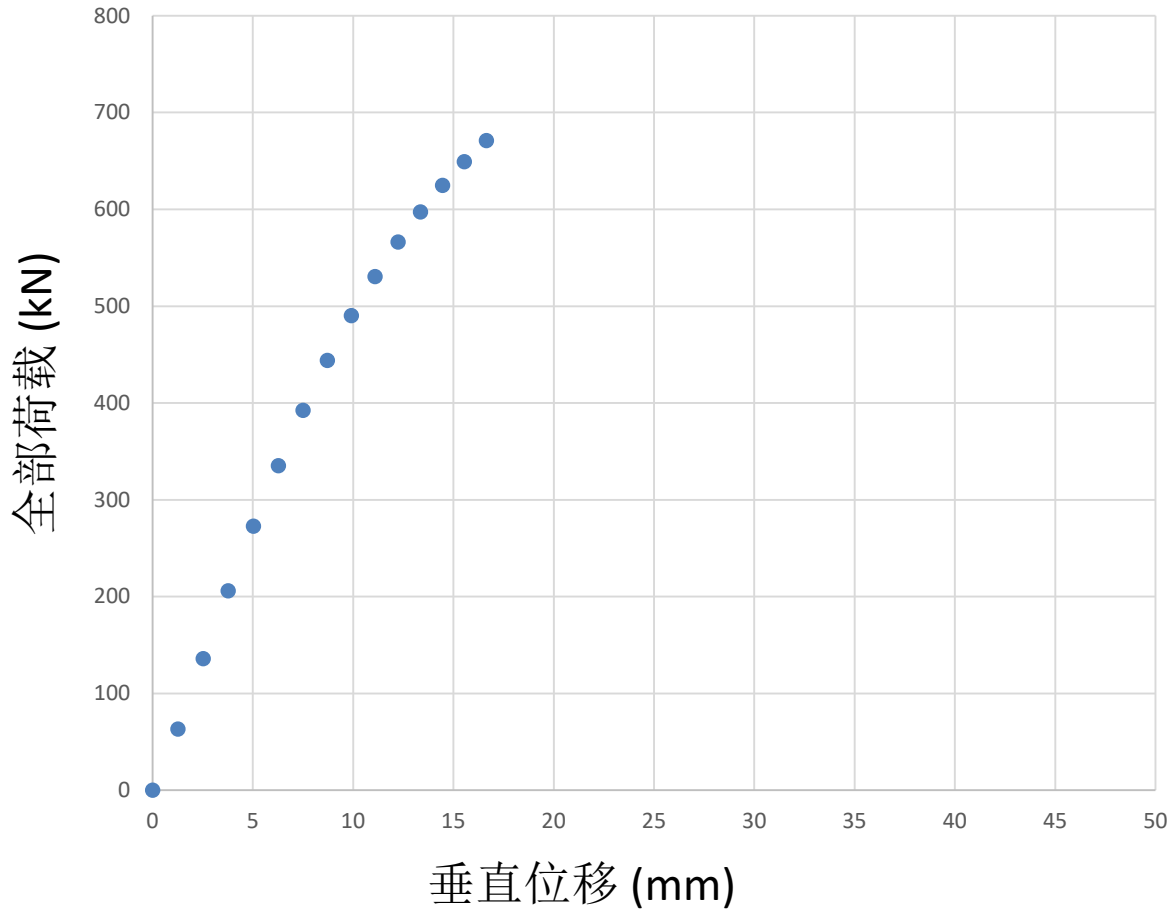
有限元模型

- 荷载-挠度曲线的计算
 - 结果：弹性行为和初始屈服



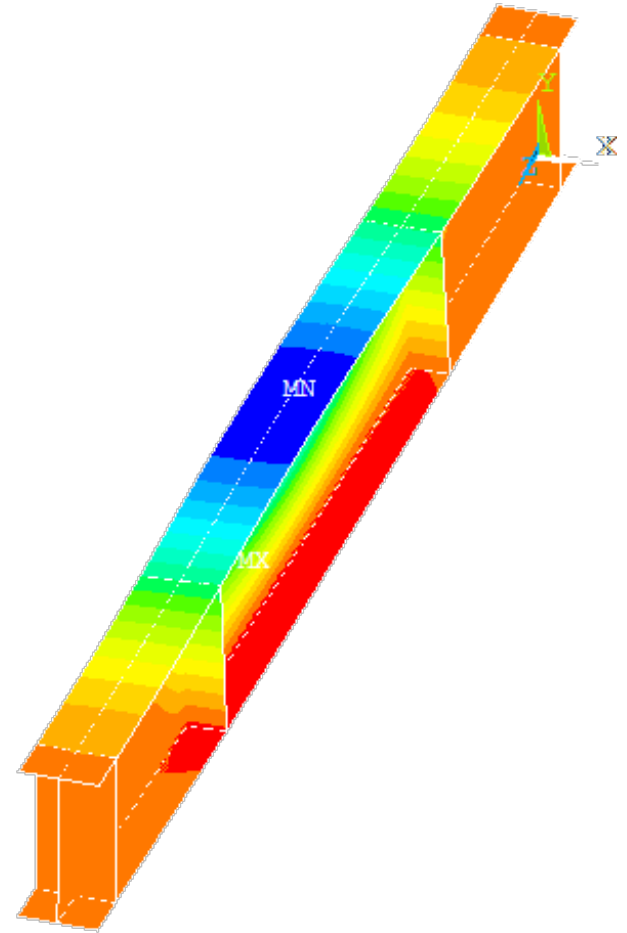
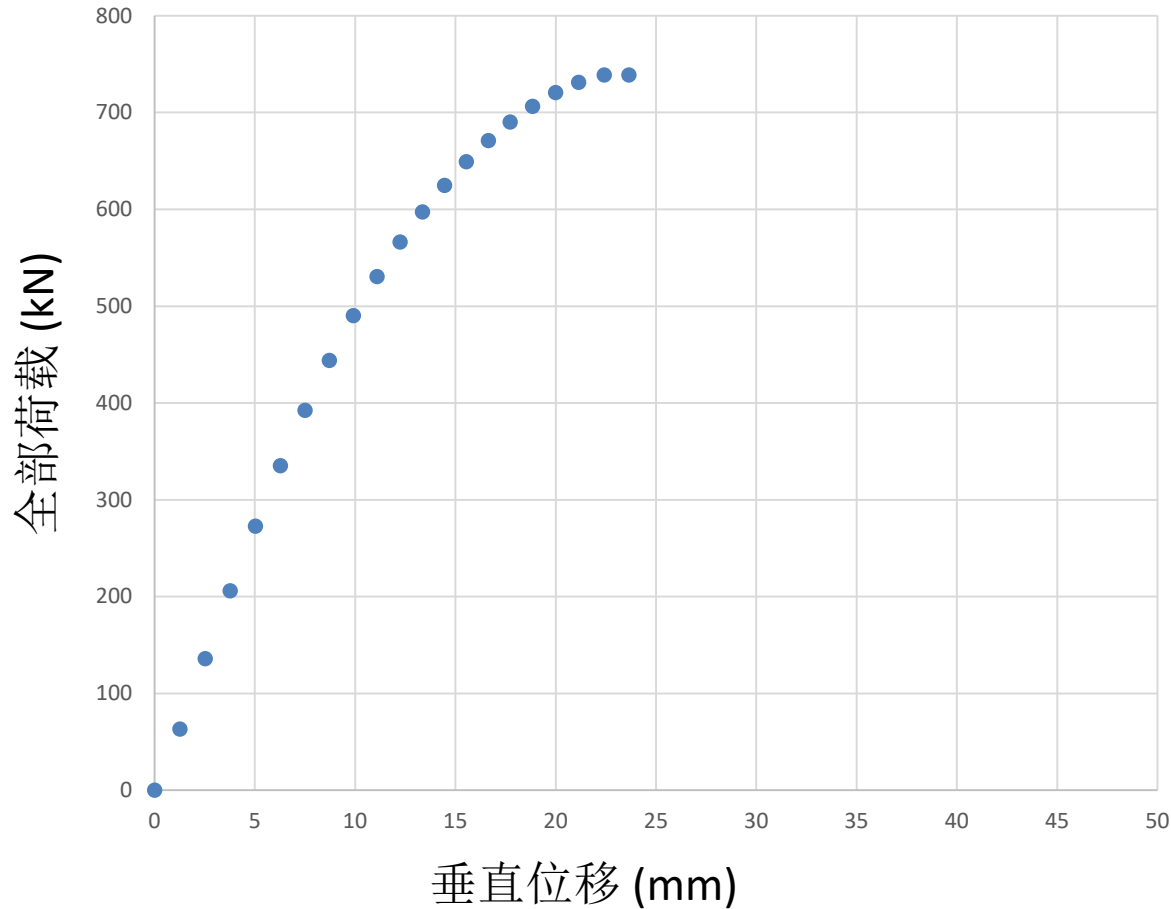
有限元模型

- 荷载-挠度曲线的计算如下
 - 结果：不稳定现象 => 横向扭曲屈曲



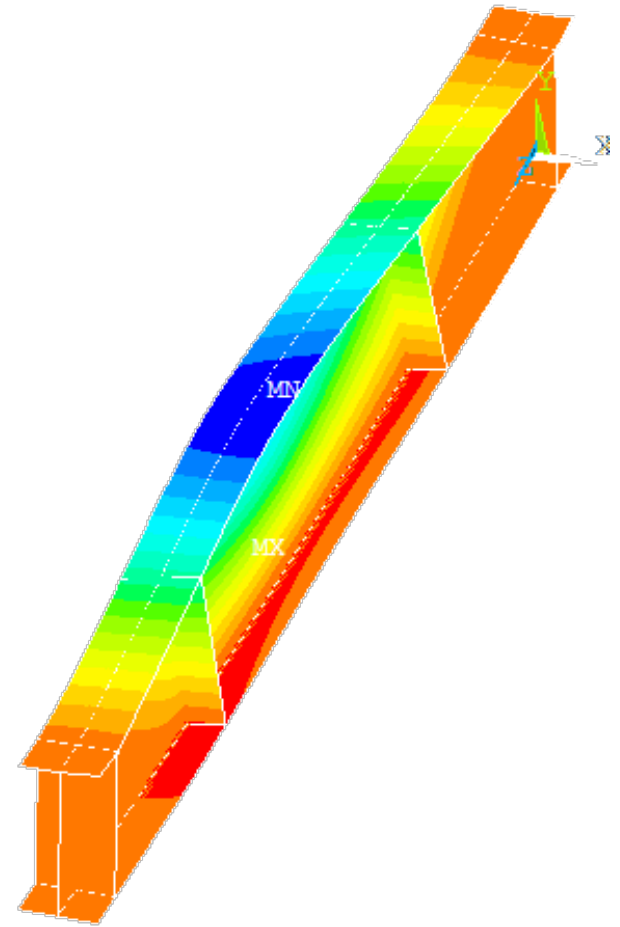
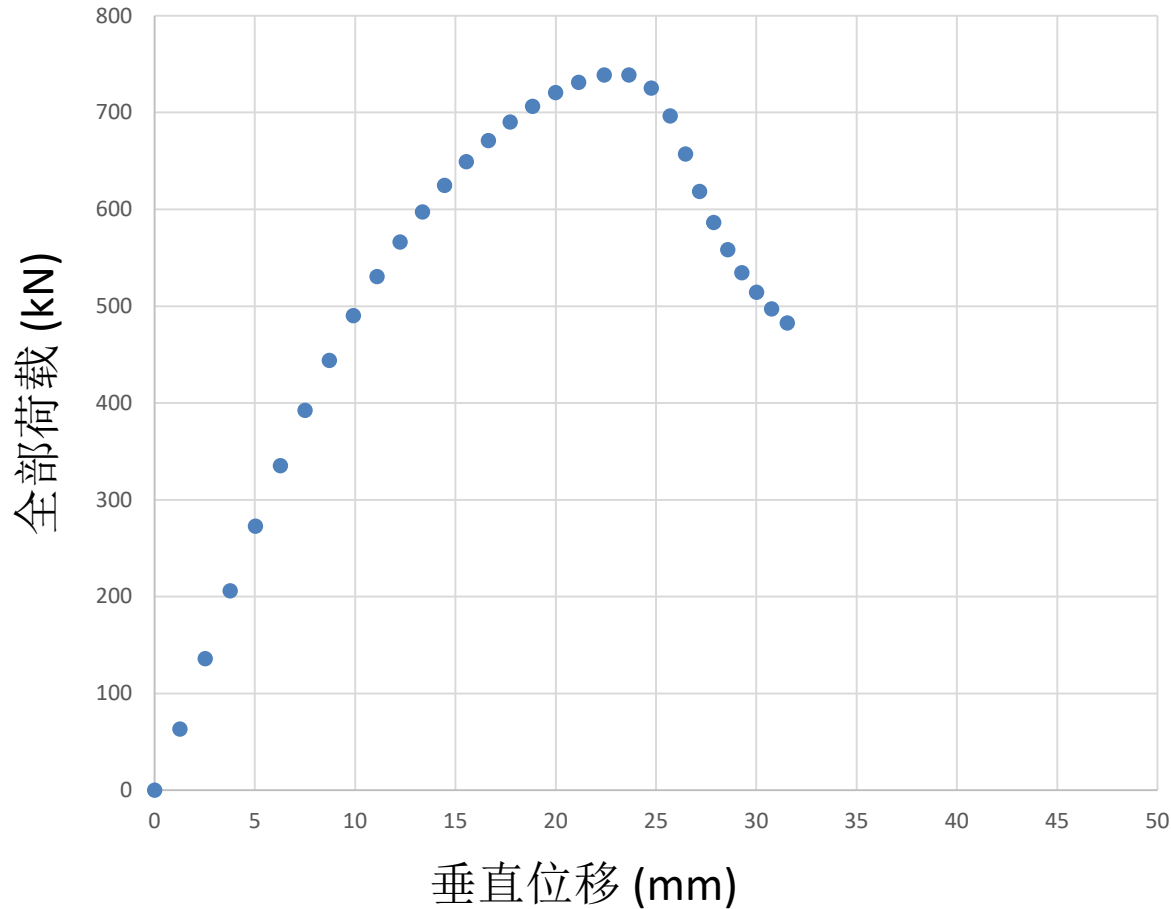
有限元模型

- 荷载-挠度曲线的计算如下
 - 结果：不稳定现象 => 横向扭曲屈曲



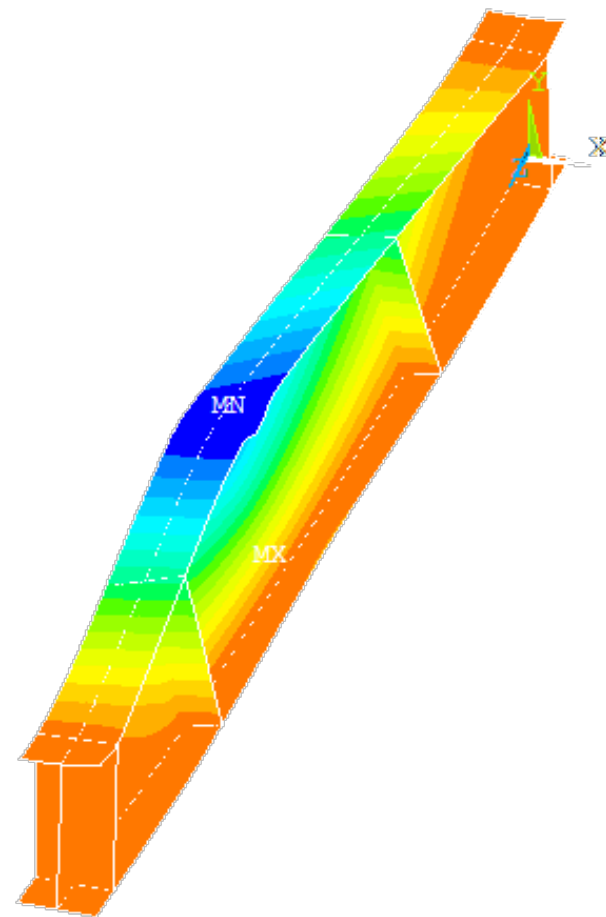
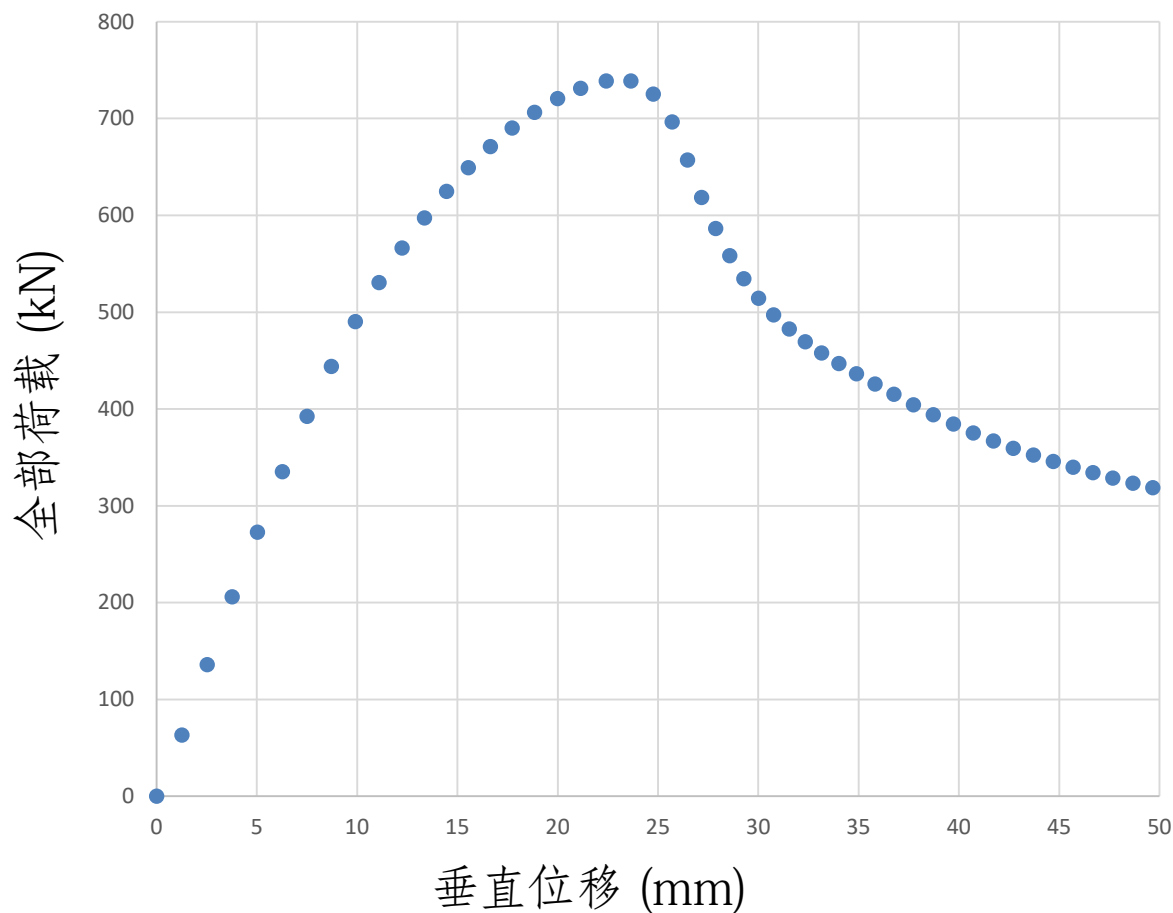
有限元模型

- 荷载-挠度曲线的计算如下
 - 结果：后屈曲行为

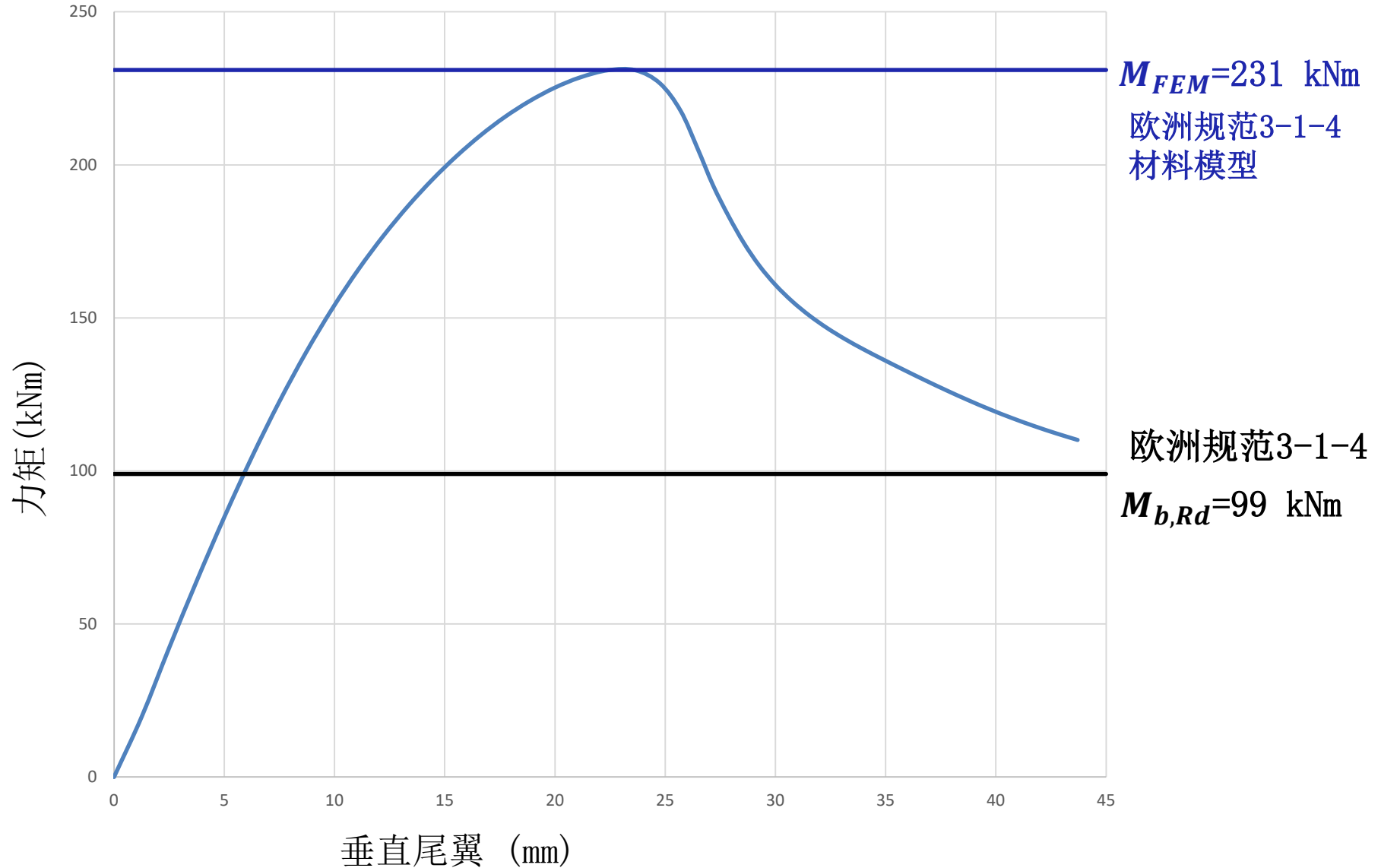


有限元模型

- 荷载-挠度曲线的计算如下
 - 结果：后屈曲行为

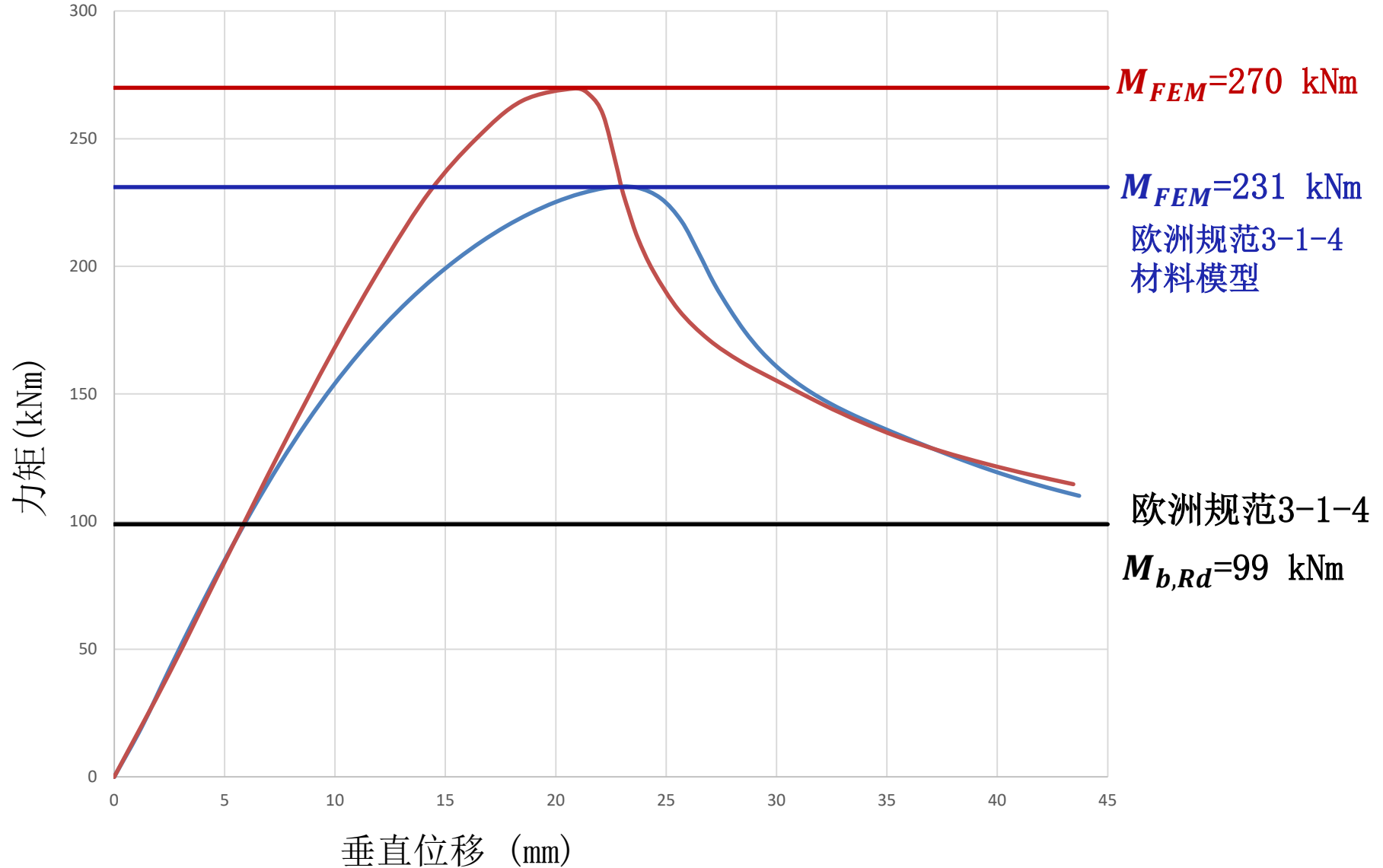


有限元模型



有限元模型

测量的材料参数



第5部分

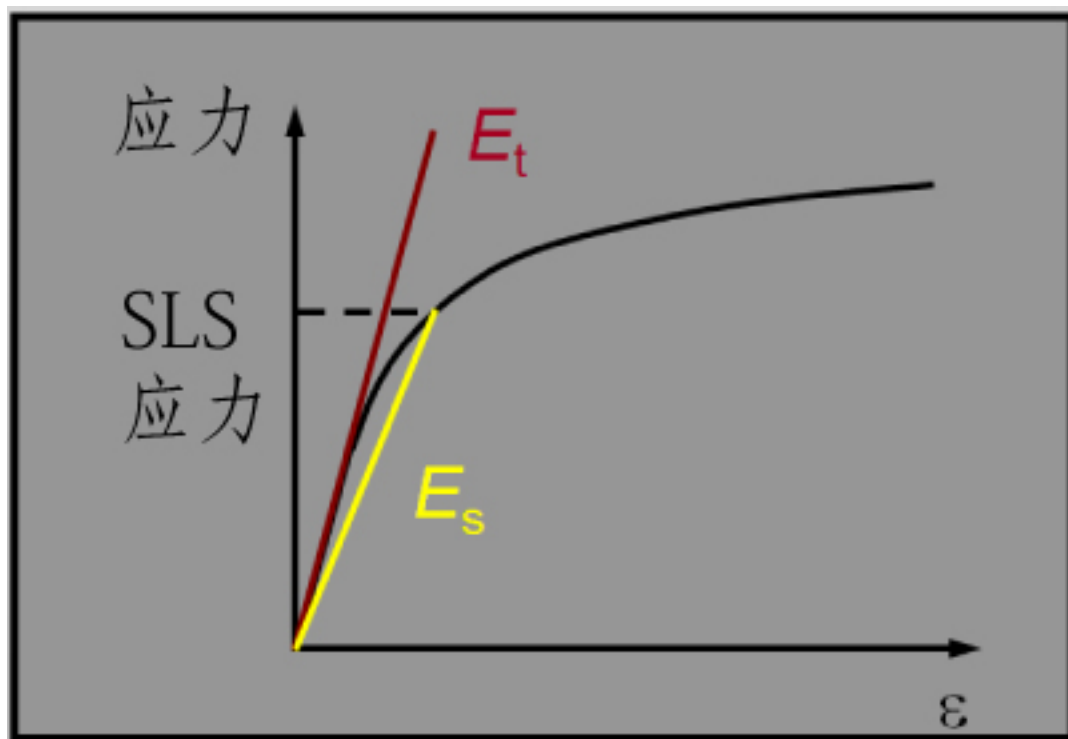
挠度

挠度

- 非线性应力—应变曲线表明，随着应力的增加，不锈钢硬度降低
- 不锈钢的挠度比碳钢略大
- 在构件正常使用极限状态（SLS）下，应力处采用割线模量

挠度

- 在正常使用极限状态SLS下，构件应力的割线模量 E_s



挠度

- Ramberg-Osgood 模型决定的割线模量 E_S :

$$E_S = \frac{E}{1 + 0.002 \frac{E}{f} \left(\frac{f}{f_y} \right)^n}$$

f 是正常使用极限状态下的应力

n 是非线性材料常数

奥体钢梁的挠度

应力比 f / f_y	割线模量, E_S N/mm ²	% 挠度的增加
0.25	200,000	0
0.5	192,000	4
0.7	158,000	27

f = 正常使用极限状态的应力

第6部分

其他信息

地震荷载相应

- 高延展性（奥氏体不锈钢）+ 支持更多负载周期
⇒ 循环加载下滞回耗能更高
- 加工硬化更高
⇒ 提高大变形塑性区的发展
- 应变率依赖性更强 -
⇒ 应变率快，强度高

螺栓连接的设计

- 螺栓和母材的强度和耐腐蚀性应相似
- 应使用不锈钢螺栓来连接不锈钢构件，以避免双金属腐蚀
- 不锈钢螺栓也可用于连接镀锌钢和铝构件

螺栓连接的设计

- 间隙孔用不锈钢螺栓的规则一般适用于不锈钢（拉伸、剪切）
- 为了限制不锈钢高延展性引起的变形所需的轴承阻力的特别规定

$$f_{u, \text{red}} = 0.5 f_y + 0.6 f_u < f_u$$

预紧螺栓

- 当出现下列情况时，在桥梁、塔桅结构有用：
 - 有振动荷载的连接
 - 必须避免结合部件之间的滑动
 - 施加的负载经常从正值变为负值
- 不锈钢预紧螺栓没有设计规则
- 要始终进行测试

焊接接头设计

- 碳钢设计规则一般可适用于不锈钢
- 针对特定不锈钢级，选择合适的耗材
- 不锈钢需要做好特别准备后，才可以焊接碳钢

疲劳强度

- 焊接接头的疲劳性能取决于焊缝的几何尺寸
- 奥体钢和双相钢的性能至少与碳钢一样好
- 遵循碳钢指南

第7部分

工程师可用资源



工程师的资源

- 在线信息中心
- 案例研究
- 设计指南
- 设计案例
- 软件



STAINLESS STEEL P O R T A L

100
YEARS
OF
STAINLESS
STEEL

A CENTURY OF INNOVATION

From small beginnings a hundred years ago, stainless steel has grown to be an integral part of our lives. Utilised primarily for its corrosion resistance, stainless steel is also found in applications where strength, innovation and aesthetics are important.

[VIEW WEBSITE](#)

ONLINE INFORMATION
CENTRE FOR STAINLESS
STEEL IN CONSTRUCTION

[VIEW WEBSITE](#)

DESIGN MANUAL FOR
STRUCTURAL STAINLESS
STEEL

[VIEW PUBLICATION](#)

STRUCTURAL STAINLESS
STEEL CASE STUDIES

[VIEW CASE STUDIES](#)



建筑用钢信息中心

www.stainlessconstruction.com

The screenshot shows the homepage of the website. The main heading is 'ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION'. Below this is a navigation menu with six categories: SPECIFICATION, CODES & STANDARDS, DESIGN, FABRICATION & INSTALLATION, CASE STUDIES, and RESEARCH. The left sidebar contains the text 'Stainless steel at your fingertips...' and 'This website will lead you to essential technical information about the use of stainless steel in construction.' Below this is a 'Featured Resource' section for 'Thames Gateway Water Treatment' and a search bar with the placeholder text 'Enter search query' and a 'GO' button. The right side of the page features a large image of a curved, stainless steel structure, possibly a water treatment component, with a view through it.

12 结构案例研究

<http://www.worldstainless.org/news/show/446>



结构用不锈钢案例研究 01

昂船洲大桥桥塔

香港昂船洲大桥为拉索结构,总长 1596 米,其中主跨长 1018 米。大桥横跨维多利亚港,于 2009 年底通车,成为进入繁忙的葵涌集装箱码头的通道。这座大桥从香港岛和九龙的很多地方都可以看到。大桥最为引人注目的特征是位于两端的尖塔状双子塔,它们支撑着长达 50 米桥面。尖塔高于海平面 286 米,下部为强化混凝土结构,上部的 115 米为由不锈钢外板和强化混凝土内芯构成的复合结构。

选材



图片 1: 昂船洲大桥全景

这座大桥的设计寿命为 120 年。鉴于大桥处于严峻的海洋和行车环境中,因此要求采用具有高耐久性的材料。此外,建造完成后,受持续不断的交通流量影响,对桥面进行维护将会非常困难。因此不锈钢具有的耐久性和吸引人的外观,将桥上的复合品构造部分选择了不锈钢作为外皮。如果可耐蚀,那就需要刷保护层,这层保护层在超过的 25-30 年后就需要重新涂装。



图片 2: 塔身和拉索

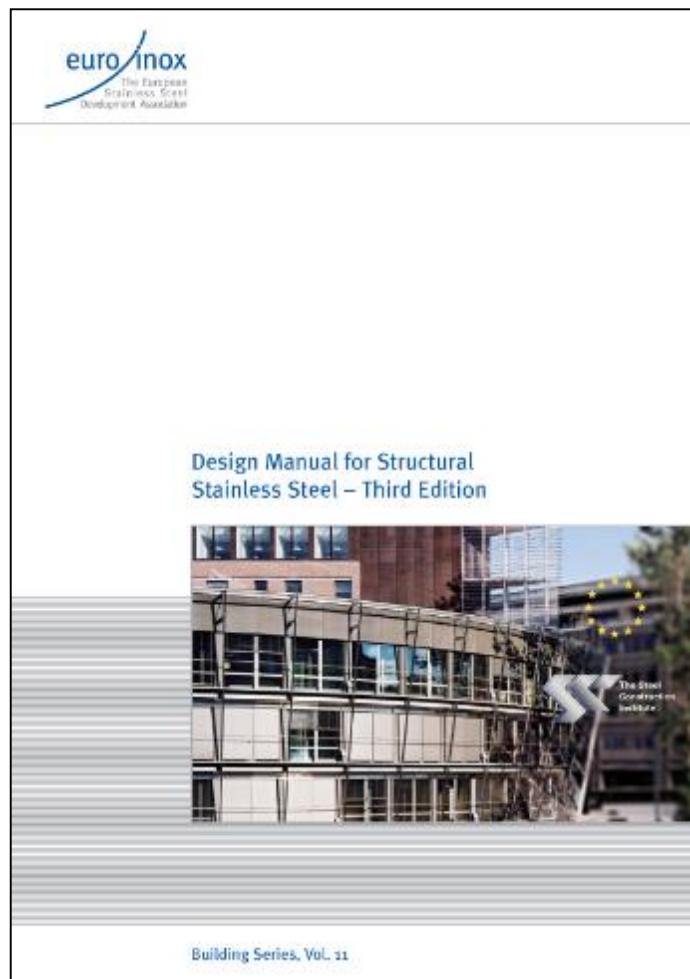
桥塔要考虑的是标准的含铜奥氏体不锈钢,但因其设计表面相对粗糙(700 N/mm²)并且,鉴于设计表面的粗糙度会导致腐蚀速率上的不确定性,而被放弃。更高合金化的奥氏体不锈钢,如 1.4579 (608904)和 1.4439 (301726),因为不可制造成本低,可获得性和强度方面的要求也未对其进行详细考察。因此桥梁 1.4462 (322209)由于其高强度(460 N/mm²)同时具有良好的耐久性和表面光滑度。

桥塔露在外面的表面均规定采用表面粗糙度为 1K 的冷轧 1K 的定义根据 EN10088 标准第 2 部分的规定,这种表面的平均粗糙度为 R_a 0.5 μm。通过使用氧化铝和玻璃珠的复合磨料对表面进行喷丸处理,从而获得了一种有轻度纹理,无方向性,低反射率的表面。

结构用不锈钢案例研究 01



欧洲规范设计指南



www.steel-stainless.org/designmanual

- 指南
- 评论
- 设计案例

在线设计软件:

www.steel-stainless.org/software

总结

- 结构性能：
与碳钢相似，但由于非线性应力—应变曲线，需要调整或改进
- 开发了设计规则
- 资源（设计、指南、案例研究、 样例软件）都可以免费获取！



谢谢

Barbara Rossi - barbara.rossi@kuleuven.be
Maarten Fortan - maarten.fortan@kuleuven.be

参考

- EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of steel structures - Part1-1: General rules and rules for buildings. 2005
- EN 1993-1-4. Eurocode 3: Design of steel structures - Part1-4: Supplementary rules for stainless steel. 2006
- EN 1993-1-4. Eurocode 3: Design of steel structures - Part1-4: Supplementary rules for stainless steel. Modifications 2015
- M. Fortan. Lateral-torsional buckling of duplex stainless steel beams - Experiments and design model. PhD thesis. 2014-...
- AISI Standard. North American specification Appendix 1: Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using the Direct Strength Method. 2007
- B.W. Schafer. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 766-778
- S.Afshan, L. Gardner. The continuous strength method for structural stainless steel design. Thin-Walled Structures 68 (2013) 42-49