

建築・土木科講師用補助教材

第7章B

ステンレス鋼板の構造用途

構造用ステンレス ステンレスを使った設計

Nancy Baddoo (ナンシー・バドゥー)

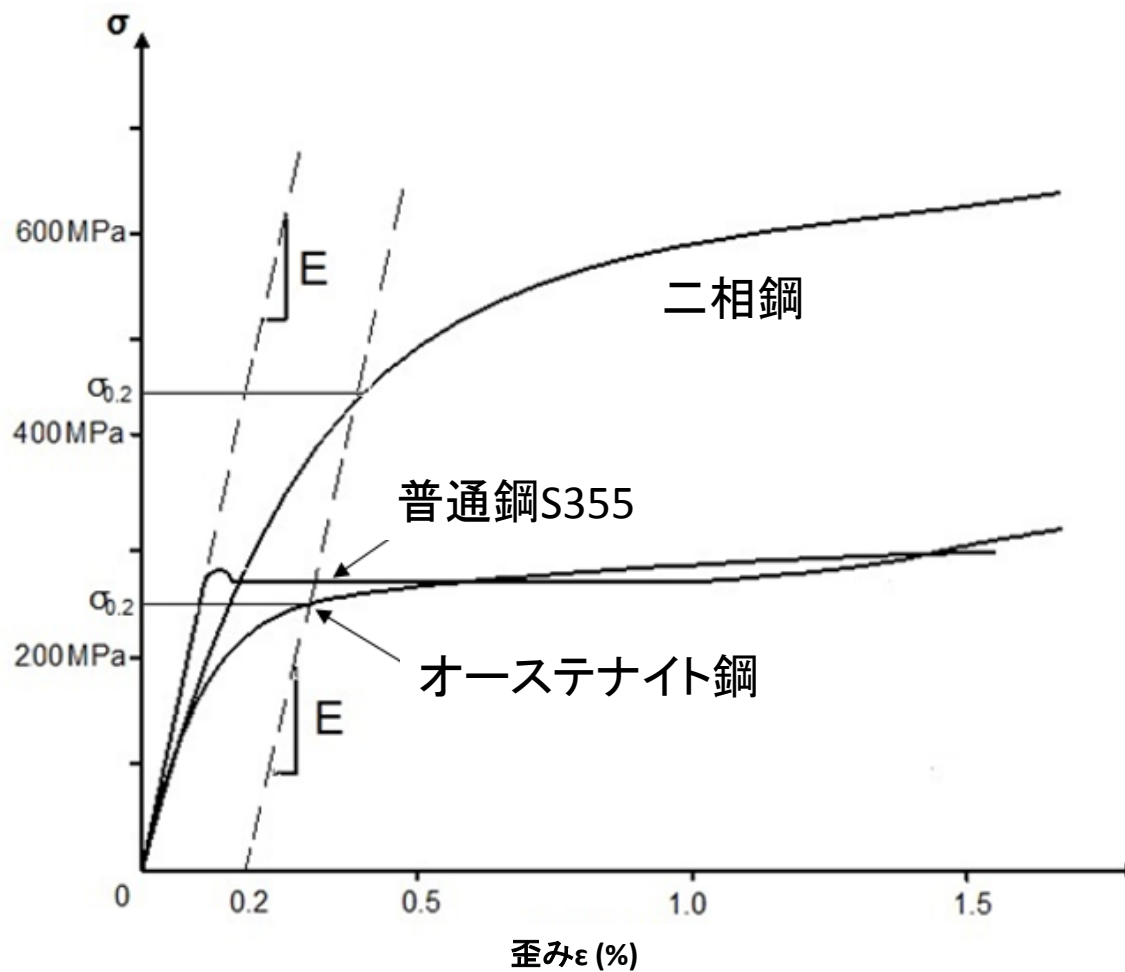
Steel Construction Institute

Ascot (アスコット, 英国)

概要

- 応力・歪み挙動
- 構造的耐力
- 世界の設計基準
- 組立・接続部材の設計規定
- エンジニアのための設計参考資料

応力・歪み特性 — 低歪み

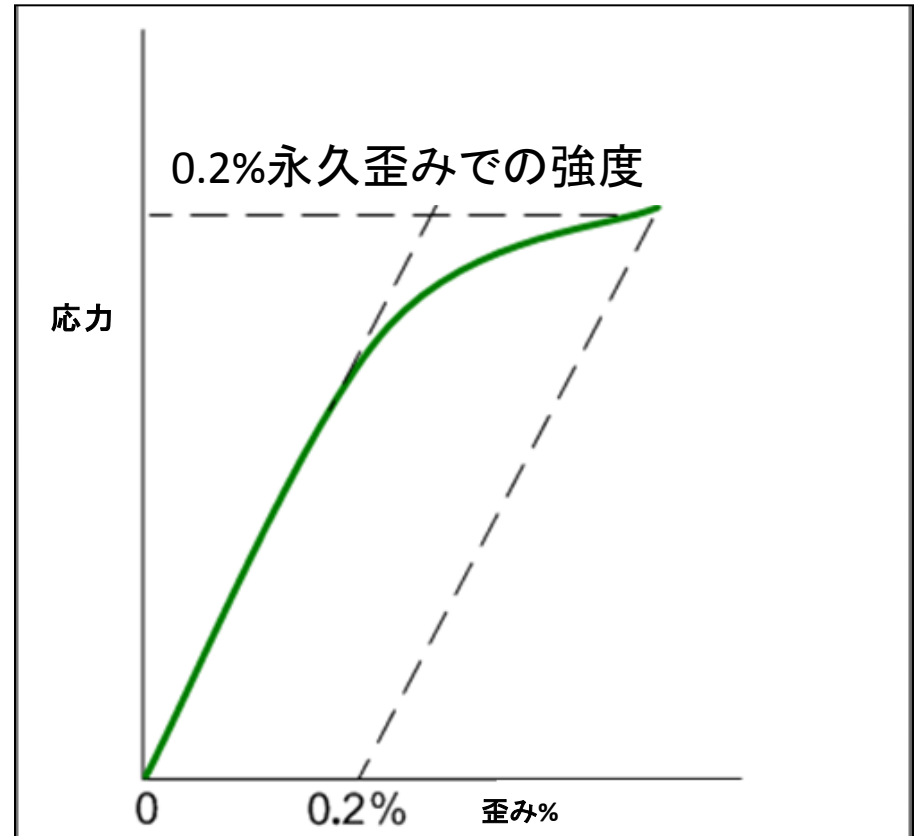


応力・歪み特性： 普通鋼とステンレスの比較

- 普通鋼
明確な降伏点
塑性降伏プラトー
- ステンレス
漸進的な降伏
高い歪み硬化

設計上の降伏力

$f_y = 0.2\%$ 永久歪み
での強度



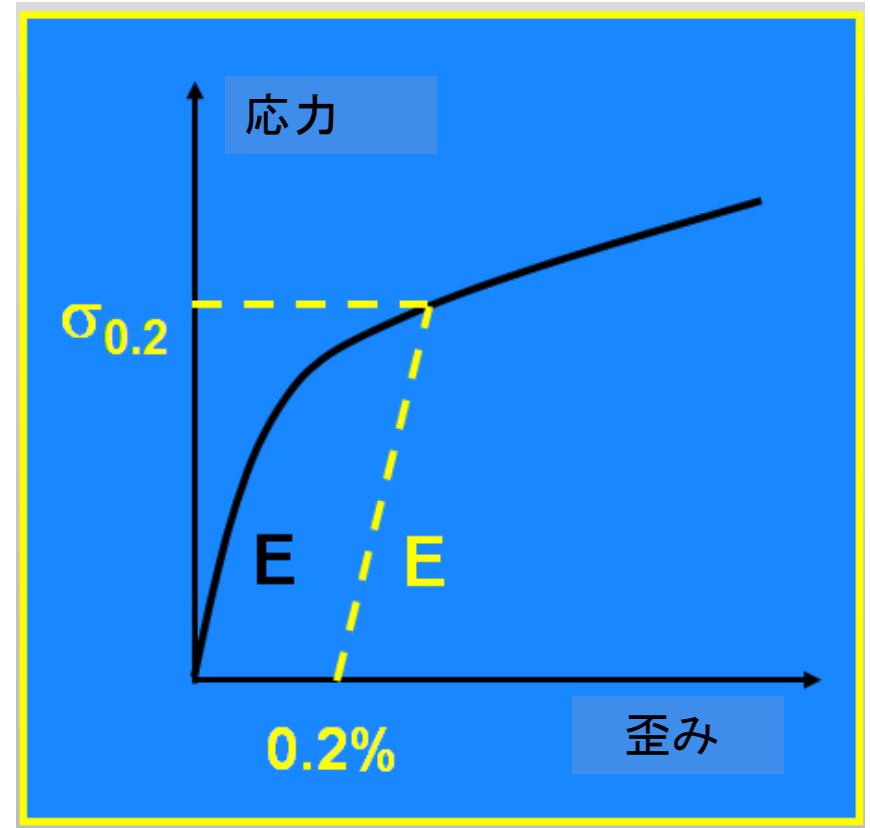
ステンレスの設計強度

材料仕様では0.2%の最低耐力が規定されている

オーステナイト鋼: $f_y = 220-250$ MPa

二相鋼: $f_y = 400-460$ MPa

ヤング率, $E=200,000$ MPa



歪み硬化

(加工硬化または冷間加工)

- 塑性変形により強度が上昇
- 鉄鋼メーカーでの生産工程または加工工程での冷間成形によるもの

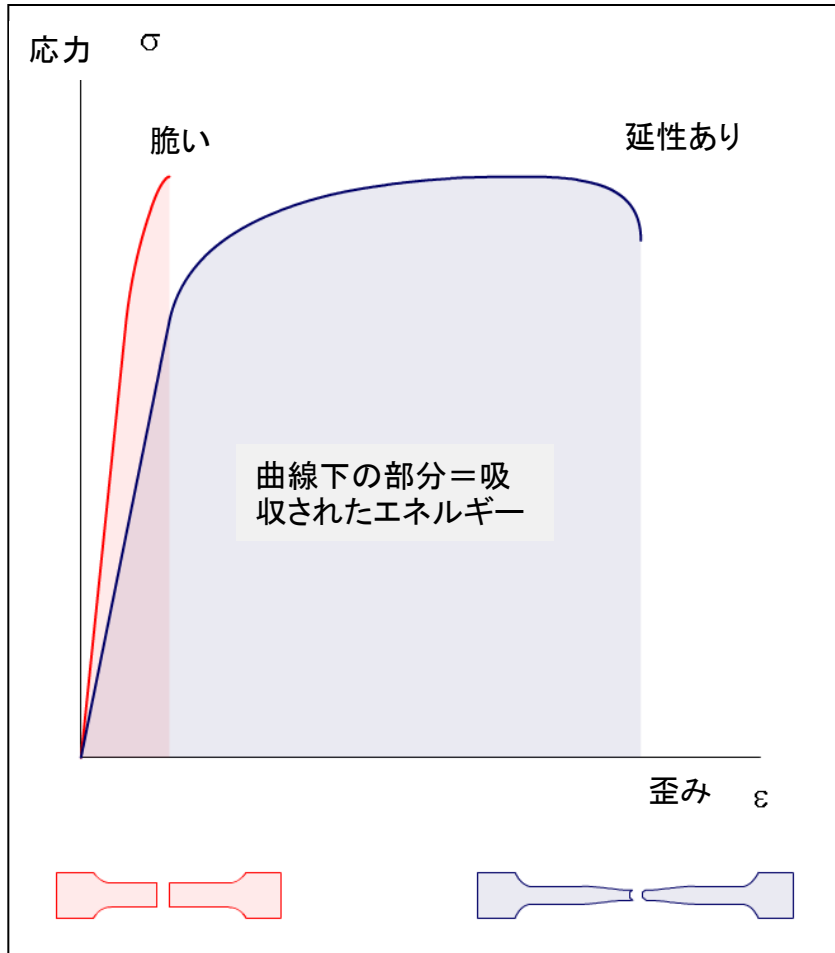
長方形空中断面の製作中に0.2%の耐力は冷間成形された横断面で約50%上昇する

歪み硬化—常に有用とは限らない

理由は：

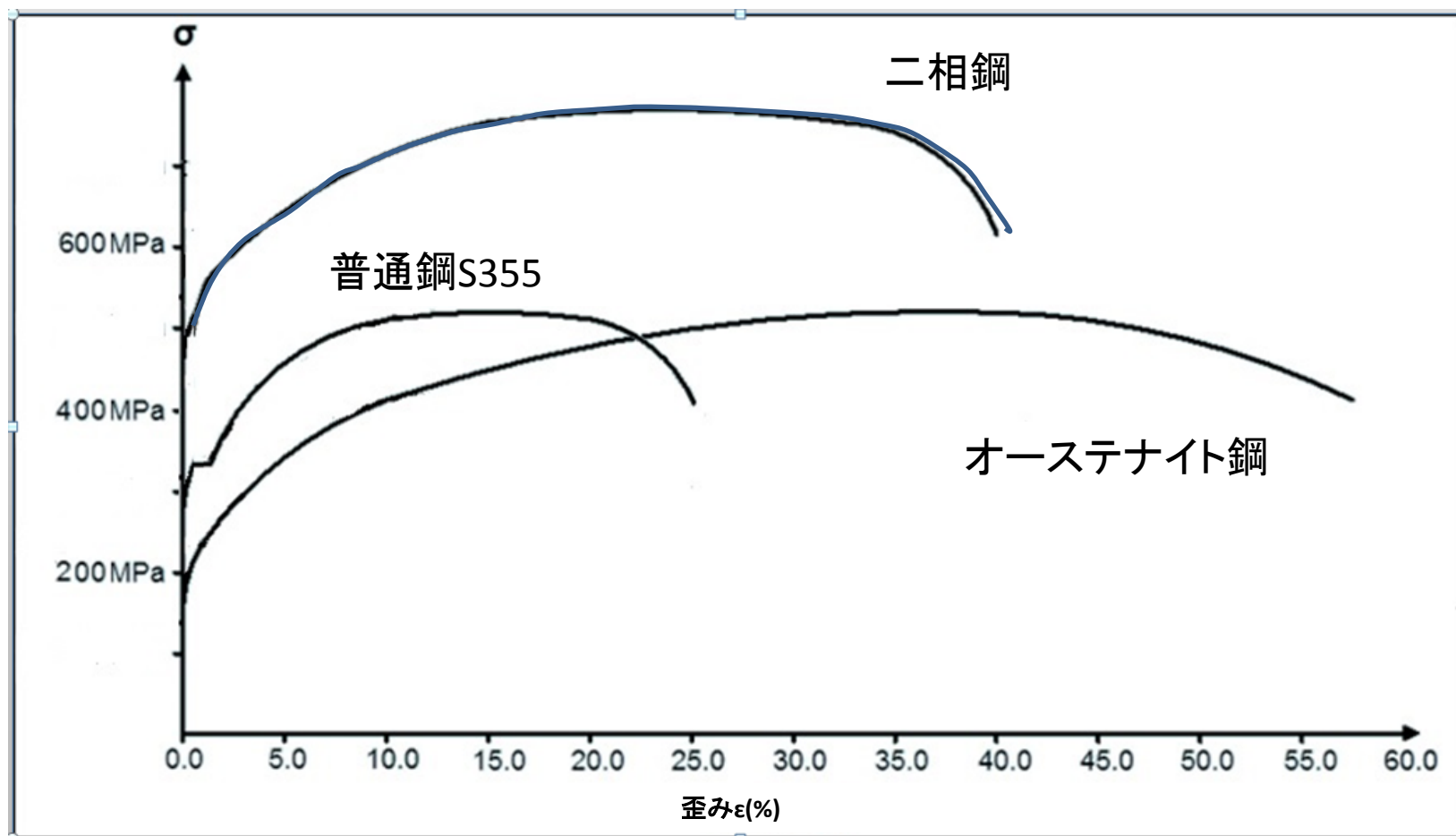
- より大型で強力な製造設備が必要となる
- より強い力が必要となる
- 延性の低下（但し特にオーステナイト鋼では初期延性が高い）
- 望ましくない残存応力が発生する場合もある

延性と靱性



- 延性 — 割れずに延びる力
- 靱性 — エネルギーを吸収し、壊れずに塑性的に変形する力

応力・歪み特性 — 高歪み



ステンレスはアルミや普通鋼に比べ高い歪み硬化と優れた延性により
本質的にエネルギー吸収力が高い

ステンレス車両の破損はその高いエネルギー吸収力により衝撃を受けた局所に
限定された



耐衝撃／衝突建造物



安全車止めポール



海上プラットフォームの甲板に建設中の
台形耐衝撃壁

応力・歪み特性

非線形性により;

- 局部座屈に対応し限界幅・厚み比率を変えられる
- 圧縮や曲げの際に組立部材の座屈挙動が異なる
- たわみが大きくなる

の事象につながる。

座屈性能への影響

- 低細長比

柱類は圧潰負荷に耐えるか、これを超え、歪み硬化の利点が明確となる

ステンレスの性能は普通鋼と同等

- 高細長比

軸方向強度、応力とも低く、線形部分に見られる

ステンレスも普通鋼に類似した挙動を示し、同様の幾何学的および残存応力を示す。

座屈性能への影響

- 中位細長比

柱類の平均的応力は比例限界と0.2%永久歪みの間にある。

ステンレスの柱は普通鋼ほど強くはない。

ステンレス組立部材の設計

- 基本的方法は普通鋼と同じものを用いる
- 張力を要する組立部材や制約のある梁についても普通鋼と同じ規定を用いる
- 断面分類限界、局部座屈や部材座屈カーブに関しては若干違った方法を用いる必要がある。

理由は：

- 非線形性応力歪みカーブ
- 歪み硬化特性
- 残存応力の違い

である。

国際設計規格

構造用ステンレスについて
入手可能な国際設計規格は？



Hamilton Island Yacht Club
(ハミルトン・アイランド・ヨット・クラブ,
オーストラリア)

EN 1990

構造上の安全性、有用性および耐久性

EN 1991

構造物への影響

EN 1992

EN 1993

EN 1994

EN 1995

EN 1996

EN 1999

設計と詳細説明

EN 1997

地質工学的設計

EN 1998

耐震設計

ユーロコード (Eurocodes) 間の相互関係

Eurocodes
(ユーロコード)
はすべての一般
的建材を網羅し
た構造設計規定
の完全な集成で
ある

Eurocode 3: Part1 (EN 1993-1)

EN1993-1-1 総則と建物関連規定

EN1993-1-2 防火構造設計

EN1993-1-3 冷間加工組立部材と仕切板

EN1993-1-4 ステンレス

EN1993-1-5 メッキ構造部材

EN1993-1-6 殻構造の強度と安定性

EN1993-1-7 横方向荷重の平面メッキ構造の強度と安定性

EN1993-1-8 接合の設計

EN1993-1-9 鉄鋼建造物の疲労強度

EN1993-1-10 破壊靱性と厚み方向特性に関する鉄鋼の選定

EN1993-1-11 張力部材を含む構造物の設計

EN1993-1-12 高張力鋼に関する補則

Eurocode3: Part1-4 (EN1993-1-4)

鉄鋼構造物の設計

ステンレスに関する補足規定(2006)

- Eurocode3の他の部分に記載されている普通鋼の規定を必要に応じ修正・補足している
- 建物、橋梁、タンク等に適用される

Eurocode 3: ステンレス構造物の設計

Part1-4 ステンレスに関する補足規定

部材の種類

- 熱延・溶接
- 冷間成形
- 棒鋼

鋼種

- フェライト系3鋼種
- オーステナイト系16鋼種
- 二相系2鋼種

対象範囲

- 組立部と接続部
- 耐火性 (EN1993-1-2を参考にして規定)
- 疲労 (EN1993-1-9を参考にして規定)

その他の設計規格

- 日本：
2規格—冷間成形用と溶接ステンレス組立部材用
- 南ア、オーストラリア、ニュージーランド：
冷間成形ステンレス組立部材用
- 中国：
策定中
- 米国：
ASCE—冷間成形部材用仕様、
AISC—熱延・溶接ステンレス構造材用設計ガイド

Eurocode 3: 鉄鋼建造物の設計

Part1-4: ステンレスに関する補則

ステンレスの設計
規定概要は
EN1993-1-4に記
載されている



Seven World Trade Center(セブン・ワールド・
トレード・センター, ニューヨーク) 入り口天蓋の
耐衝撃柱

EN1993-1-4の断面分類と局部座屈の表現

- 限界幅・厚み比率が普通鋼に比べて低い
- 細長比要素の有効幅の計算に際して若干異なる表現が使われている

但し、

EN1993-1-4の次の版では限界と有効幅の表現がより踏み込んだものになる予定

張力部材、柱および梁の設計

- 一般的に普通鋼と同じ方法で設計する
- 但し、柱や制約のない梁の座屈に対しては異なる座屈カーブを用いる(LTB)
- 鋼種に対して正しい f_y を使用する(EN10088-4および5に最低数値が規定されている)

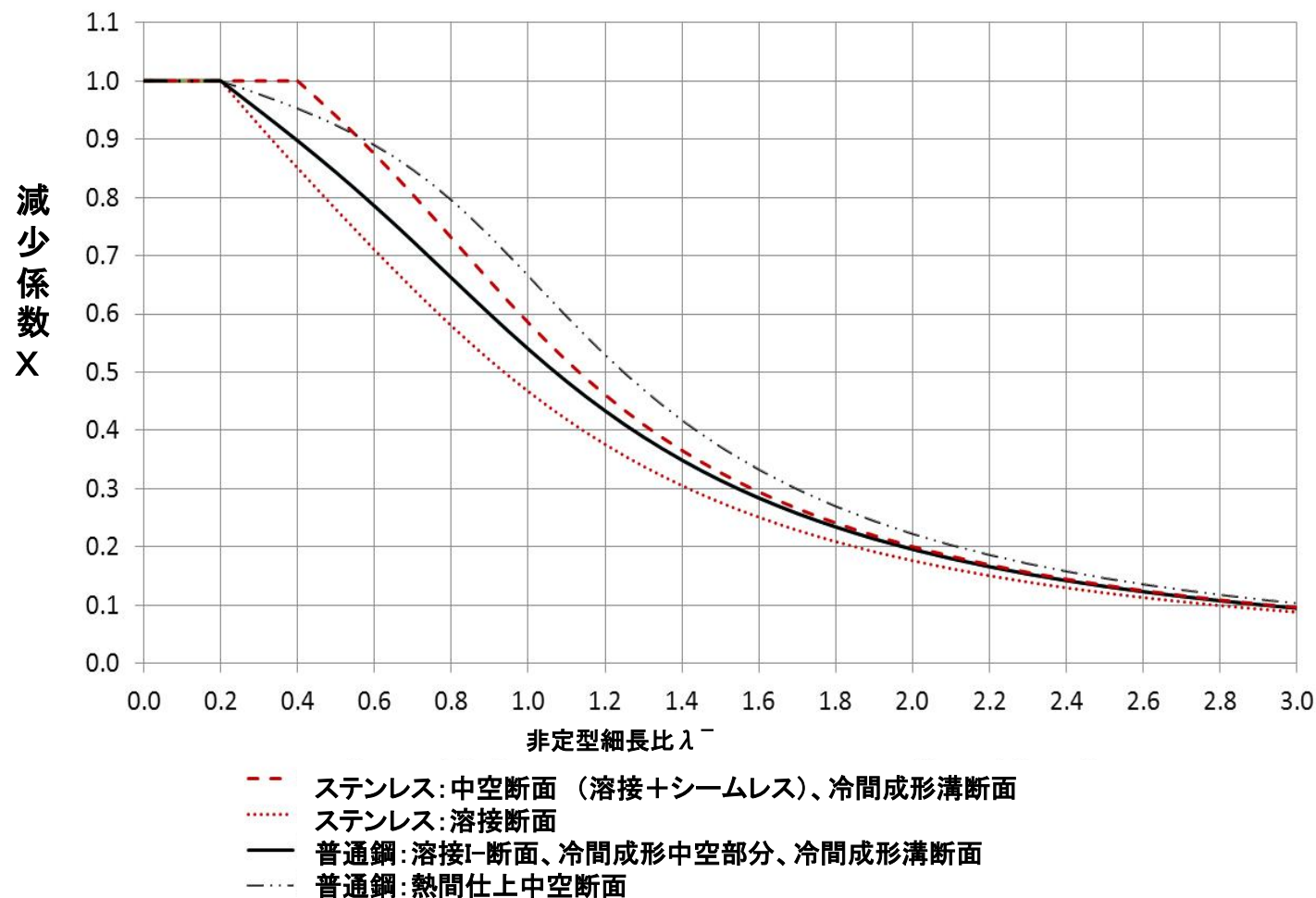
曲げ座屈

座屈カーブの選択は横断面、製造方法や軸による

表5.3 曲げ、ねじりおよびねじり曲げ座屈に対する α と $\bar{\lambda}_0$

座屈モード	部材の種類	α	$\bar{\lambda}_0$
曲げ	冷間成形開放断面	0,49	0,40
	中空断面（溶接およびシームレス）	0,49	0,40
	溶接開放断面（主要軸）	0,49	0,20
	溶接開放断面（補助軸）	0,76	0,20
ねじりー曲げねじり	すべての部材	0,34	0,20

Eurocode3 曲げ座屈カーブ



水平ねじれ座屈抵抗

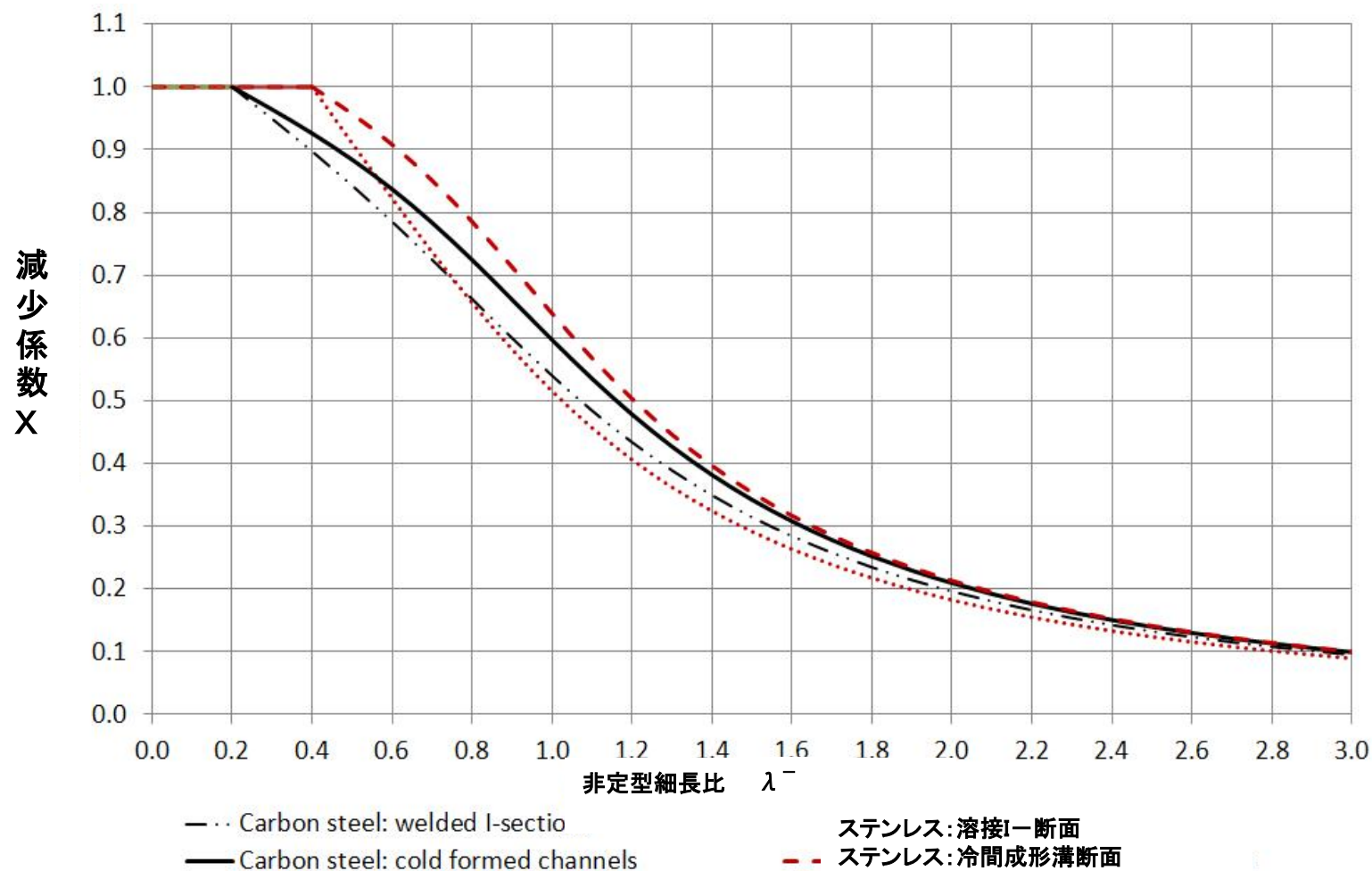
普通鋼と同じ方法を用いるが欠陥係数や限界細長比は変更する

$\alpha_{LT} = 0.34$ — 冷間成形断面

$\alpha_{LT} = 0.76$ — 溶接開放断面やテストデータがない他の断面

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$$

Eurocode3 水平ねじれ座屈カーブ

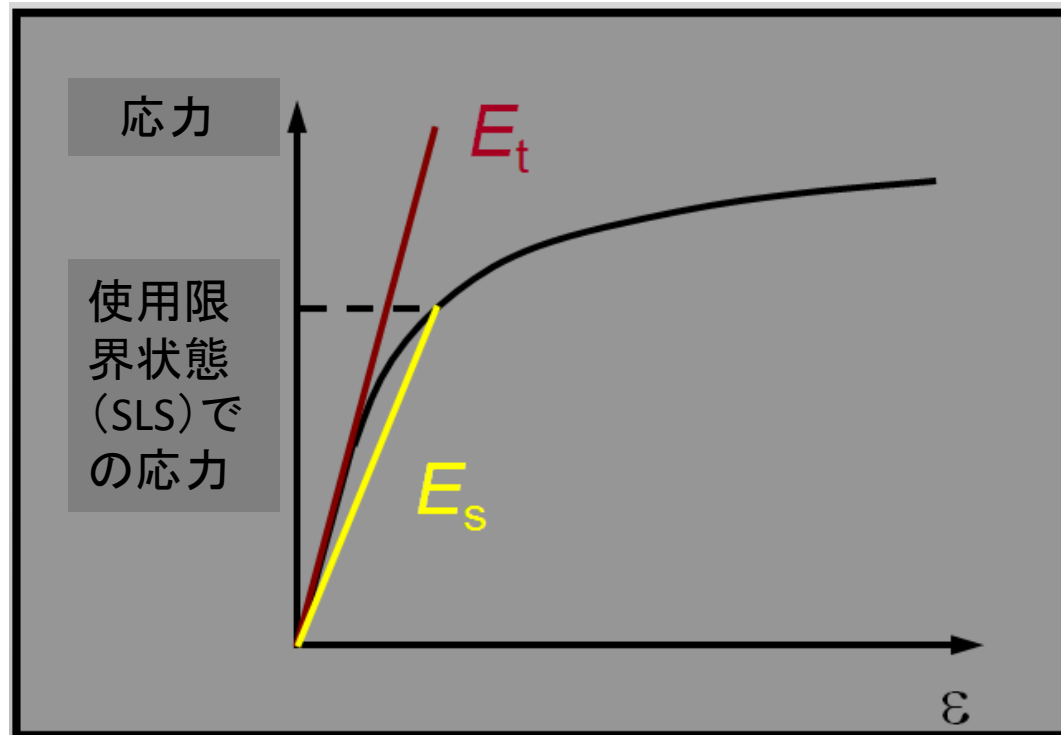


たわみ

- 非線形応力－歪みカーブは応力が上昇するとステンレスの剛性が低下することを意味する
- たわみはステンレスの方が普通鋼より若干大きい
- 使用限界状態(SLS)での組立部材への応力については割線係数を使用する

たわみ

使用限界状態 (SLS) での組立部材への応力についての割線係数 E_s



たわみ

Ramberg-Osgood (RO)モデルから算出される割線
係数 E_s :

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

f 使用限界状態 (SLS) での応力

n 材料定数

オーステナイト鋼梁のたわみ

応力率 f/f_y	割線係数 E_s N/mm ²	たわみの%↑
0.25	200,000	0
0.5	192,000	4
0.7	158,000	27

f = 使用限界状態 (SLS) での応力

地震荷重への対応

- 高い延性(オーステナイト系ステンレス)はより厳しい負荷サイクルに耐えられる
 - 負荷サイクル下でのヒステリシス・エネルギー拡散が大きい
- 高い加工硬化
 - 大きく、かつ変形可能な塑性領域の生成を促進する
- 強い歪み速度依存性
 - 早い歪み速度での高強度につながる

ボルト結合の設計

- ボルトと母材の強度と耐食性が近似であること
- 異種金属接触腐食を避けるためステンレス製部材にはステンレス製ボルトを使用する
- ステンレス製ボルトは亜鉛メッキ鋼材やアルミ製部材にも使用できる

ボルト結合の設計

- ばか穴に関する普通鋼ボルトの規定が一般的にはステンレスにも適用できる(張力、せん断)
- ステンレスの高い延性を考慮し、変形を限定するために支持力に関する特別規定が必要となる

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

組み込みボルト

以下の状況で橋梁、搭、マスト等に有用

- 結合部に振動負荷がかかる
- 結合部のスリップを避ける必要がある
- 掛かる負荷がしばしば＋値から一値に変わる
- 特にステンレス製組み込みボルトの設計規定はない
- 常にテストを行うこと

溶接結合の設計

- 一般的には普通鋼の設計規定がステンレスにも適用できる
- 母材のステンレス鋼種に適した消耗電極等を使用する
- ステンレスは普通鋼にも溶接できるが特別な準備が必要となる

疲労強度

- 溶接部分の疲労挙動は溶接形状に支配される
- オーステナイト鋼と二相鋼の疲労強度は少なくとも普通鋼と同等である
- 普通鋼のガイドラインを適用すること

エンジニアのための情報源

- オンライン情報センター
- 事例研究
- 設計ガイド
- 設計例
- ソフトウェア

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

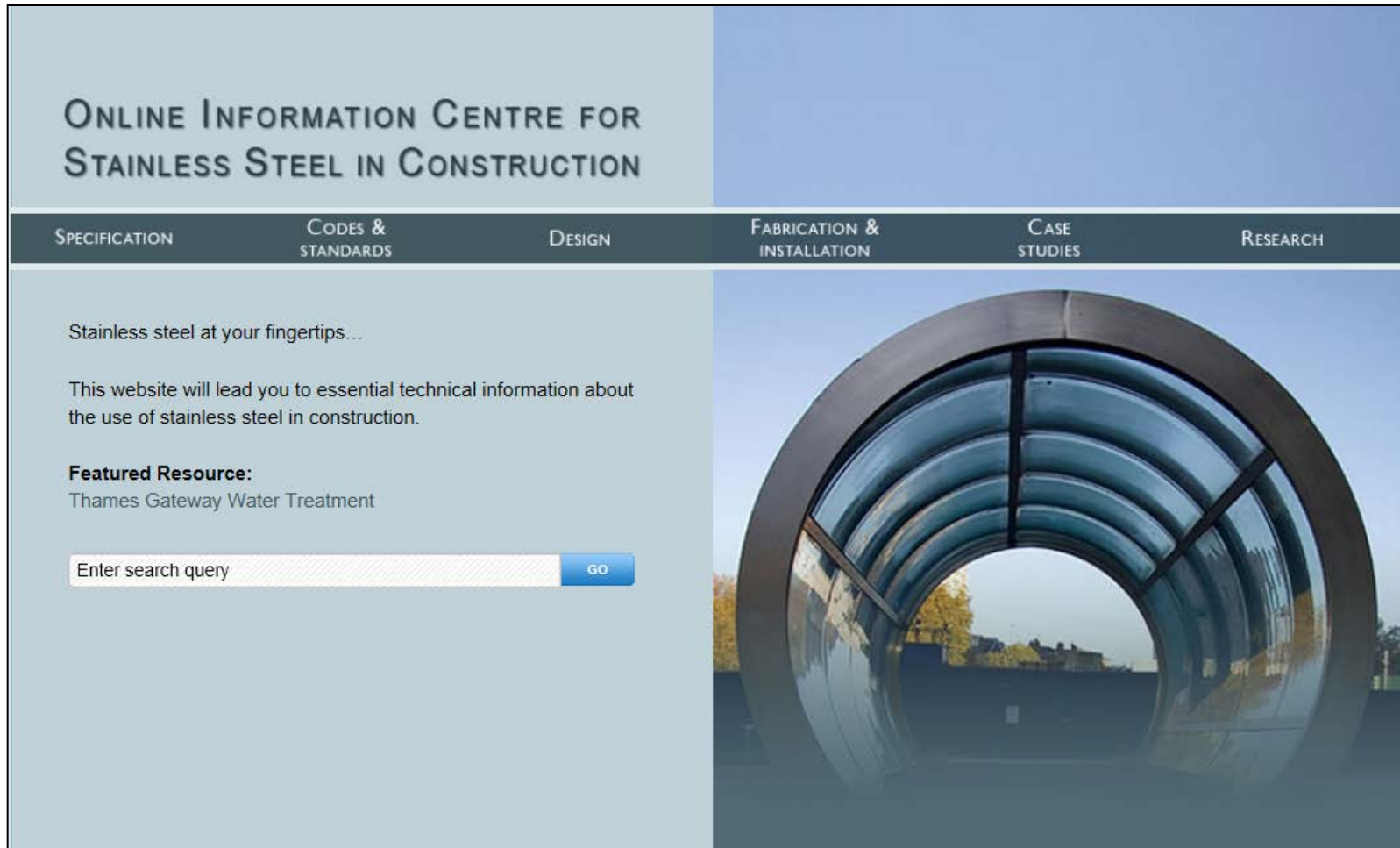
[VIEW PUBLICATION](#)

STRUCTURAL STAINLESS
STEEL CASE STUDIES

[VIEW CASE STUDIES](#)

建築情報センターのステンレス関連ページ

www.stainlessconstruction.com



構造関連12事例の研究

www.steel-stainless.org/CaseStudies



Structural Stainless Steel Case Study 01

Stonecutters Bridge Towers

Stonecutters Bridge, Hong Kong, is a cable stayed structure with a total length of 1596 m and a main span of 1018 m. The bridge crosses the Rambler Channel and is the main entrance to the busy Kwai Chung Container Port. It is visible from many parts of Hong Kong Island and Kowloon. The most striking features of the bridge are the twin tapered mono towers at each end supporting the 50 m wide deck. These tapered towers rise to 295 m above sea level; the lower sections are reinforced concrete while the upper 115 m are composite sections with an outer stainless steel skin and a reinforced concrete core.

Material Selection



Figure 1: General view of Stonecutters Bridge

The design life of the bridge is 120 years. A highly durable material was required for the upper sections of the bridge towers because of the harsh marine and polluted environment. Additionally, post-construction maintenance on the towers will be extremely difficult, due to the live traffic beneath. Stainless steel was chosen for the skin of the composite section of the upper tower because of its durability and also its attractive appearance. Carbon steel would have required protective coatings that would have needed replacing after an estimated 25-30 years.

Standard molybdenum-alloyed austenitic steel grades were initially considered but discounted because of their relatively low design strength (220 N/mm²) and uncertainty regarding corrosion performance, given the roughness of the desired surface finish. Higher alloyed austenitics with better corrosion resistance, e.g. 1.4539 (N08904) and 1.4439 (S31726), were not considered in detail as they would not have met the requirements for cost, availability and strength. Duplex steel 1.4462 (S32205) was chosen as it has high strength (462 N/mm²) with good corrosion resistance and tolerance on surface finish.

Structural Stainless Steel Case Study 01



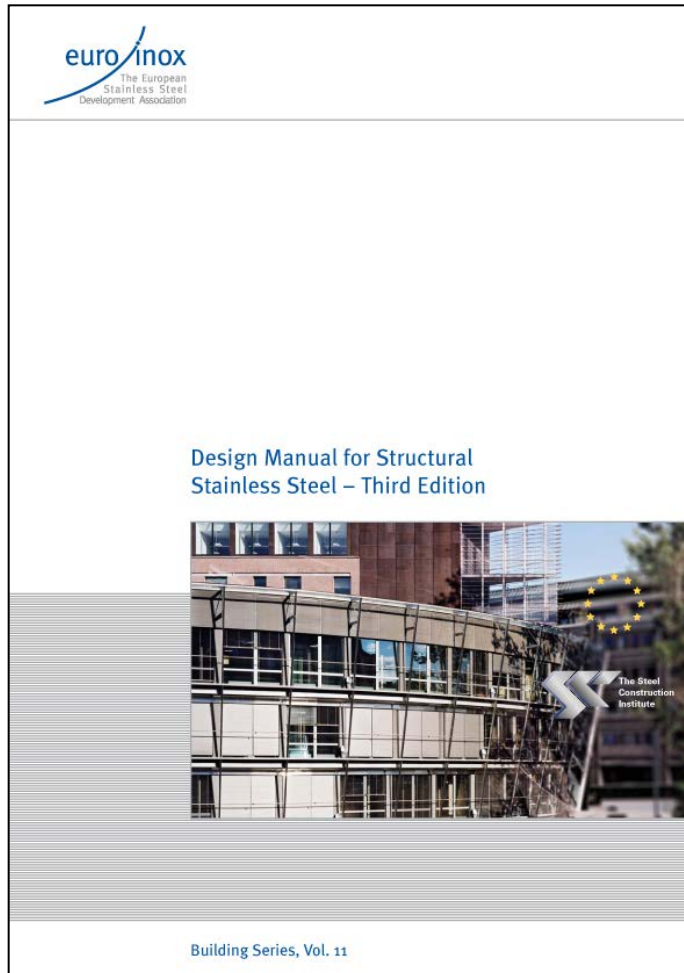
Figure 2: Mono tower and stay cables

A polished 1K finish (as defined in EN 10088 Part 2 (1)) was specified for all exposed surfaces, with an average surface roughness R_a of 0.5 μ m. A slightly textured, non-directional, low reflective appearance was then created by shot peening the surface with a mixture of aluminium oxide and glass beads.

Page 1



Eurocodeへの設計指導書



www.steel-stainless.org/designmanual

- 指導書
- 注釈
- 設計例

Online design software:

(オンライン設計ソフト)

www.steel-stainless.org/software

www.steel-stainless.org/software

Stainless Steel in Construction Design software for cold-formed stainless steel

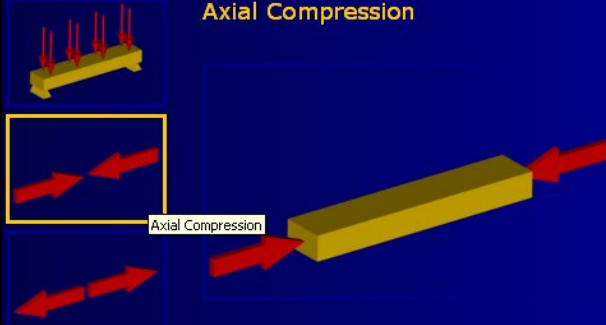
Home | Design Manual | Feedback | Help | About

Loading Mode | Section Geometry | Member Geometry | Material | Section Properties | Member Resistances | Summary

How is the member loaded? Select the type of loading by clicking on one of the loading buttons. The partial safety factors are from EN 1993-1-4. They can be modified by clicking in the relevant input box. Click on proceed to continue.

- Help
- Reset
- **Proceed...**

Axial Compression



Partial safety factors

γ_{M0}

γ_{M1} 1.1

γ_{M2}

Axial compression

A member is under a compression if it is braced or compacted or squashed externally applied load temperature change.

Click on this Loading button to apply "Axial Compression"

Copyright © 2002-2006, The Steel Construction Institute. All rights reserved.

Stainless Steel in Construction Design software for structural stainless steel

Home | Design Manual and Specifications | Feedback | Help | About

Loading Mode | Section Geometry | Member Geometry | Material | Section Properties | Member Resistances | Summary | Fire Resistances

Mode of Loading: Bending

Select a section: User defined
Standard sections

Select hot rolled or laser welded section and then click on one of the section buttons. Click on proceed to continue.

- Help
- Reset
- **Proceed...**

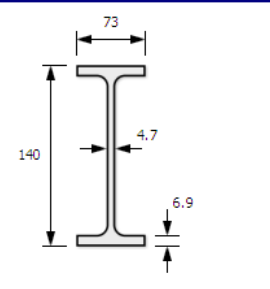
IPE 140

Available Sections:

Montanstahl Stainless Steel Sections

- IPE 80
- IPE 100
- IPE 120
- **IPE 140**
- IPE 160
- IPE 180
- IPE 200
- IPE 220
- IPE 240
- IPE 270
- IPE 300
- IPE 330

Dimensions:



<http://www.montanstahl.com>

Cross-section images are shown for indicative purposes and do not reflect given proportions

まとめ

- 構造的耐力

普通鋼に近似しているが非線形の応力－歪みカーブにより若干の修正が必要となる

- 設計規定は策定されている

- 参考資料（設計ガイド、事例研究、加工例、ソフトウェア）は自由に利用できる

ステンレス建造物の例



建造物

Villa Inox (フィンランド)



建造物

Gare Sint Pieters, Ghent (ベルギー)

設計 : Wefirna Bur. d'études : THV

Van Laere-Braekel Aero

建造物

Porto (ポルトガル)



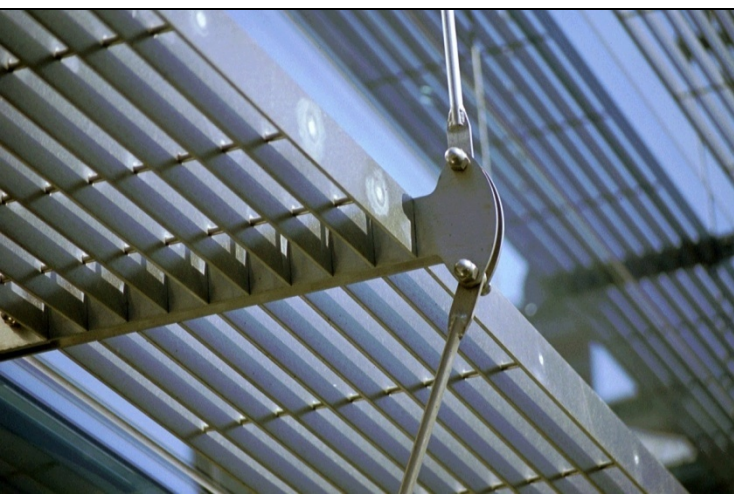


Ecole Royale
Militaire, ブラッセル

設計 : AR.TE

Bur. d'études :
Tractebel
Development

建造物



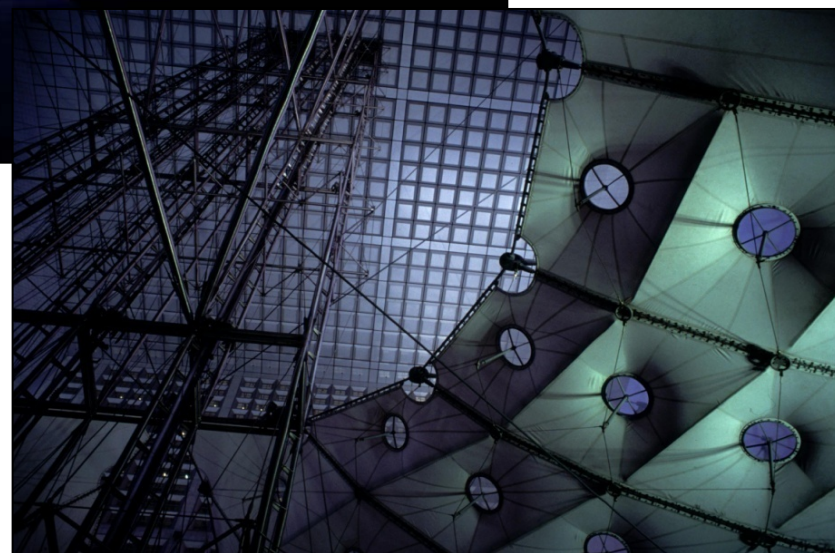


建造物

La Grande Arche, パリ

設計 : Johan Otto von Spreckelsen

Bur. d'études : Paul Andreu



建造物

La Lentille de Saint-Lazare,
パリ

設計: Arte Charpentiers &
Associés

Bur. d'études : Mitsu
Edwards

