

建築・土木科 講師用補助教材

第7章A

ステンレス鉄筋の構造用途

誤った鋼種選択は 大きな問題を引き起こす





インターチェンジでの腐食事例

Turcot highway interchange

(ターコットインターチェンジ、モントリオール、カナダ)

- 1966年に建設されたDearie (デカリエ = 南北) と Ville Marie (ビル・マリ = 東西) 2本の高速道路のインターチェンジ
- 1日の交通量は300,000台以上
- 鉄筋コンクリート製だが今日では除氷岩塩により著しく腐食している。

建て替えが必要となる

- 常時監視し、修理を行っているにもかかわらず、取り外すか部分的な建て替えが必要となる
 - 現在までのコスト概算：30億ドル
 - 2018年の建て替えまでにさらに2億5400万ドルが必要となる。
- この建造物の耐用年数はわずか50年しかない。

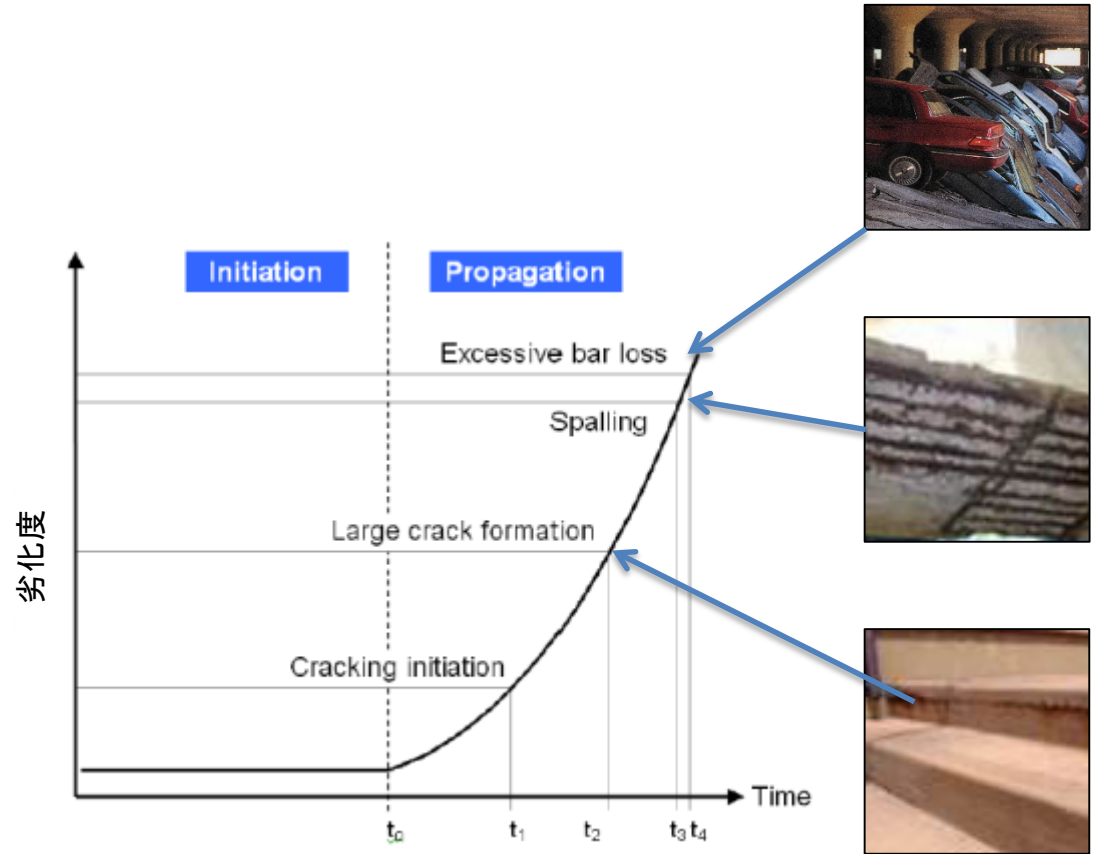


どのようにして鉄筋コンクリート
が腐食により損傷するのか

コンクリート内部への 腐食性イオン(一般的に塩化物イオン)の拡散

順序³:

1. 最初に炭素鋼の鉄筋が腐食する(t_0)
2. 鋼材よりも大きな体積となった腐食生成物は外側に圧力を与える
3. コンクリートに亀裂が入り、塩化物イオンが侵入し易い環境となる(t_1)
4. コンクリートの外装が割れ(スポーリング)、鉄筋がむき出しとなる(t_3)
5. 修復をしない場合、腐食が進行し、鉄筋が強度限界を迎え建物が崩壊する(t_4)



コンクリートの亀裂が腐食を進行させる

コンクリートには亀裂が入ることがあり、この亀裂を介して腐食性イオンが鉄筋に到達することがある。

亀裂発生の原因については、参考サイト4を参照してください。

亀裂はすぐには発生せず、また修復が不可能な隠された場所でも発生する点にご注意下さい。

正しい鋼種選択は 賢明な長期投資となる

Progresso Pier(プログレッソ栈橋) (1/3)



メキシコのProgresso(プログレッソ)で1970年に栈橋が一基建造された。海浜環境のため炭素鋼が腐食し、最終的に栈橋は崩壊した。

Progresso Pier(プログレッソ棧橋) (2/3)



一方で、隣接する別の棧橋(写真の奥側)は、1937~1941年にステンレス鉄筋を使用して建造されていた。

Progresso Pier(プログレッソ栈橋) (3/3)



それ以降、この隣接するステンレス製の栈橋は
大きな改修、補修を行わずに新設時同様の状態を保持している。

主要な土木建造物は現在では
100年以上の耐用年数が必要とされる

Haynes Inlet Slough Bridge

(ヘインズ・インレット・スラウ橋, 米国オレゴン州, 2004)

デッキ部に400トンのステンレス鉄筋を使った珍しいアーチ蝶番の橋。

長さ230mのヘインズ・インレット・スラウにかかる橋はメンテナンス無しで120年は持つと考えられている。ステンレスは材料としては普通の鉄鋼よりはるかに高価だが、橋のライフ・サイクル・コストは大幅に削減される。





Broadmeadow Bridge

(ブロードメドウ橋, アイルランド ダブリン, 2003)

105トンのステンレス鉄筋を橋脚や欄干に使用して新しく作られた河口を跨ぐ橋



Hong Kong- Zhuhai- Macau Bridge

(香港—珠海—マカオ橋, 2009年着工, 2018年竣工の予定)

著名な香港—珠海—マカオを結ぶ海上路は世界最大のプロジェクトの一つである。要求される耐用年数はメンテナンス無しで120年。従って、橋脚の重要な部分—主に飛沫帯—にはステンレス鉄筋が指定されている。最終的には15,000トンのステンレスが使用される予定。



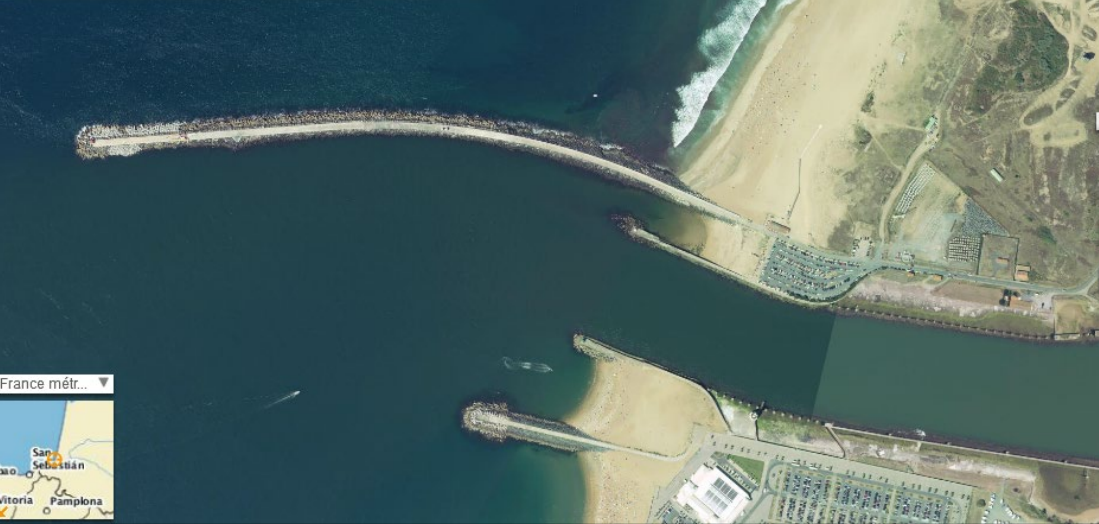
ダムの修理

Bayonne (バイヨンヌ, フランス)

港への入り口を保護するために
1960年代に建てられたダム

海側の方が高く40トンのブロックで
保護されているが、嵐で傷むので
取り替えの必要がある。

川側では幅7mのプラットフォーム
から大型クレーンでブロックを持ち
上げられるようになっている。

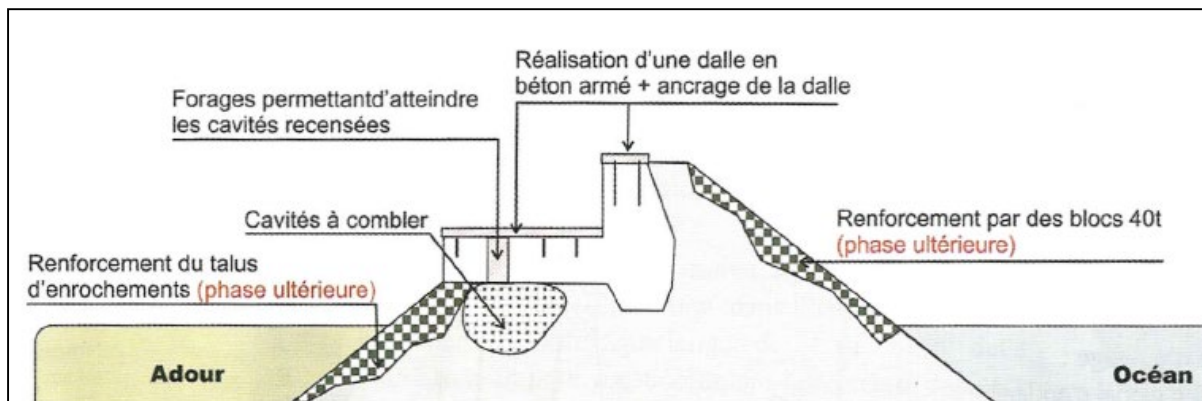


航空写真

デッキと壁の割れ目は修理の必要がある。



護岸部断面図

護岸修理
Bayonne (バイヨンヌ, フランス)

プラットフォームと護岸はリー
ンニ相鋼(EN1.4362) で補強さ
れた。

修理中の護岸

2014年の初めに強風に見舞われたダム



ステンレス鉄筋を検討すべき場合：

腐食環境：

- ・海水環境、熱帯性気候地域
 - 橋梁
 - 栈橋
 - 岸壁
 - 街頭柱や手すりのアンカー
 - 護岸
 - その他
- ・豪雪地帯（融雪塩を使用する環境）
 - 橋梁
 - 陸橋やインターチェンジ
 - 駐車場
- ・廃水処理タンク
- ・淡水化プラント
- ・耐用年数の長い建造物
 - 歴史的建造物の修復
 - 核廃棄物貯蔵
- ・使用状態が不明な環境
 - 検査が不可能
 - 修理がほとんど不可能か非常に高価となる場合

ステンレス鉄筋と他の材料との比較

	利点	欠点
エポキシ被覆	初期コストが安価	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げると割れる ・据付けの際に傷つけないよう取扱いに注意を要する
亜鉛被覆	初期コストが安価	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げると割れる ・ZnはFeより短期間で腐食し、Znが腐食すると耐食性が無くなる
FRP	初期コストが安価	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げると割れる ・厳しい冬期には耐熱性や耐衝撃性がなくなる ・鉄鋼ほど堅固ではない ・耐用年数経過後の処分も考えておく必要がある
カソード被覆	初期コストが安価	<ul style="list-style-type: none"> ・全般的保護のためデザインに注意する必要がある ・適切な電気接続が確保できるよう据付けの際にも注意を要する ・恒久的な電流原(監視とメンテナンスが必要)か監視または取り替えを要する犠牲アノードが必要となる
膜	初期コストが安価?	<ul style="list-style-type: none"> ・据付けに注意が必要 ・長期使用の場合の性能に疑問がある ・水平面に限定される
ステンレス	LCCが安価 <ul style="list-style-type: none"> ・炭素鋼と似た設計が可能 ・炭素鋼・ステンレスの組み合わせ補強が効果的 ・据付けが簡単 ・メンテナンス不要 ・耐用年数に限度がない ・コンクリート被覆を薄くできる ・耐火性にも優れている ・100%リサイクル可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期コストが高い

参考サイト／文献

1. <http://www.lapresse.ca/actualites/montreal/201111/25/01-4471833-echangeur-turcot-254-millions-pour-lentreten-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
4. <http://www.nachi.org/visual-inspection-concrete.htm> visual inspection of concrete
5. <http://www.nickelinstitute.org/en/Sustainability/LifeCycleManagement/LifeCycleAssessments/LCAProgresoPier.aspx> (progreso Pier)
6. http://www.worldstainless.org/Files/issf/Education_references/Ref08_Special-issue-stainless-steel-rebar-Acom.pdf
7. <https://www.roadsbridges.com/willing-bend-0> (oregon)
8. <http://structurae.net/structures/data/index.cfm?id=s0011506> (oregon)
9. <http://www.aeonline.ae/major-hong-kong-stainless-steel-rebar-contract-signed-by-arminox-middle-east-42317/news.html> (HK Macau)
10. <http://www.engineersireland.ie/EngineersIreland/media/SiteMedia/groups/Divisions/civil/Broadmeadow-Estuary-Bridge-Integration-of-Design-and-Construction.pdf?ext=.pdf> (Broadmeadow)
11. Courtesy Ugitech SA
12. http://www.arup.com/Projects/Stonecutters_Bridge.aspx (stonecutters'bridge)
13. www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Stonecutters_Bridge_Case_Study-2.pdf (stonecutters'bridge)
14. http://www.cif.org/noms/2008/24_Ocean_Parkway_Belt_Bridge.pdf (belt parkway bridge)
15. Béton Armé d'innox: Le Choix de la durée (French) <http://www.infociments.fr/publications/ciments-betons/collection-technique-cimbeton/ct-t81>
16. Armaduras de Acero Inoxidable (Spanish) <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
19. <http://www.sintef.no/upload/Byggforsk/Publikasjoner/Prrapp%20405.pdf> (general)
20. http://americanarminox.com/Purdue_University_Report_-_Stainless_Steel_Life_Cycle_Costing.pdf (advantages of using ss rebar)
21. <http://www.stainlesssteelrebar.org>

NEW!

異種金属接触腐食について

1. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore, M. P. Pedferri and P. Pedferri, "Effects of Galvanic Coupling between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcement in Concrete", International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998, Orlando, Florida.
2. A. Knudsen, EM. Jensen, O. Klinghoffer and T. Skovsgaard, "Cost-Effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent use of Stainless Steel Reinforcement", International Conference on Corrosion and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures, 1998, Orlando, Florida.
3. L. Bertolini, M. Gastaldi, T. Pastore and M. P. Pedferri, "Effect of Chemical Composition on Corrosion Behaviour of Stainless Steel in Chloride Contamination and Carbonated Concrete", Properties and Performances, Proceedings of 3rd European Congress Stainless Steel '99, 1999, Vol .3, Chia Laguna, AIM
4. O. Klinghoffer, T. Frolund, B. Kofoed, A. Knudsen, EM. Jensen and T. Skovsgaard, "Practical and Economic Aspects of Application of Austenitic Stainless Steel, AISI 316, as Reinforcement in Concrete", Corrosion of Reinforcement in Concrete: Corrosion Mechanisms and Corrosion Protection, 2000, Mietz, J., Polder, R. and Elsener, B., Eds, London
5. Knudsen and T. Skovsgaard, "Stainless Steel Reinforcement", Concrete Engineering, 2001, Vol. 5 (3), p. 59.
6. L. Bertolini and P. Pedferri, "Laboratory and Field Experience on the Use of Stainless Steel to Improve Durability of Reinforced Concrete", Corrosion Review, 2002, Vol. 20, p. 129
7. [S. Qian](#), [D. Qu](#) & [G. Coates](#) Galvanic Coupling Between Carbon Steel and Stainless Steel Reinforcements [Canadian Metallurgical Quarterly](#) Volume 45, 2006 - [Issue 4](#) Pages 475-483 Published online: 18 Jul 2013
8. J.T. Pérez-Quiroz, J. Teran, M.J. Herrera, M. Martinez, J. Genesca : "Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation" J. of Constructional Steel research (2008) doi:10.1016/j.jcsr.2008.07.024
9. Juliana Lopes Cardoso / Adriana de Araujo / Mayara Stecanella Pacheco / Jose Luis Serra Ribeiro / Zehbour Panossian "stainless-steel-rebar-for-marine-environment-a-study-of-galvanic-corrosion-with-carbon-steel-rebar-used-in-the-same-concrete-structure" (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> Product Number: 51318-11312-SG
10. <http://stainlesssteelrebar.org/>

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 (ステンレスを用いた建築設計について)

Nancy Baddoo(ナンシー・バドゥー)

Steel Construction Institute

Ascot(アスコット,イギリス)

概要

- S1 構造用途での採用事例
- S2 材料の機械的特性
- S3 Eurocode3に基づいた設計
- S4 代替方法
- S5 たわみ
- S6 その他追加情報
- S7 技術者向けの情報源



Section 1

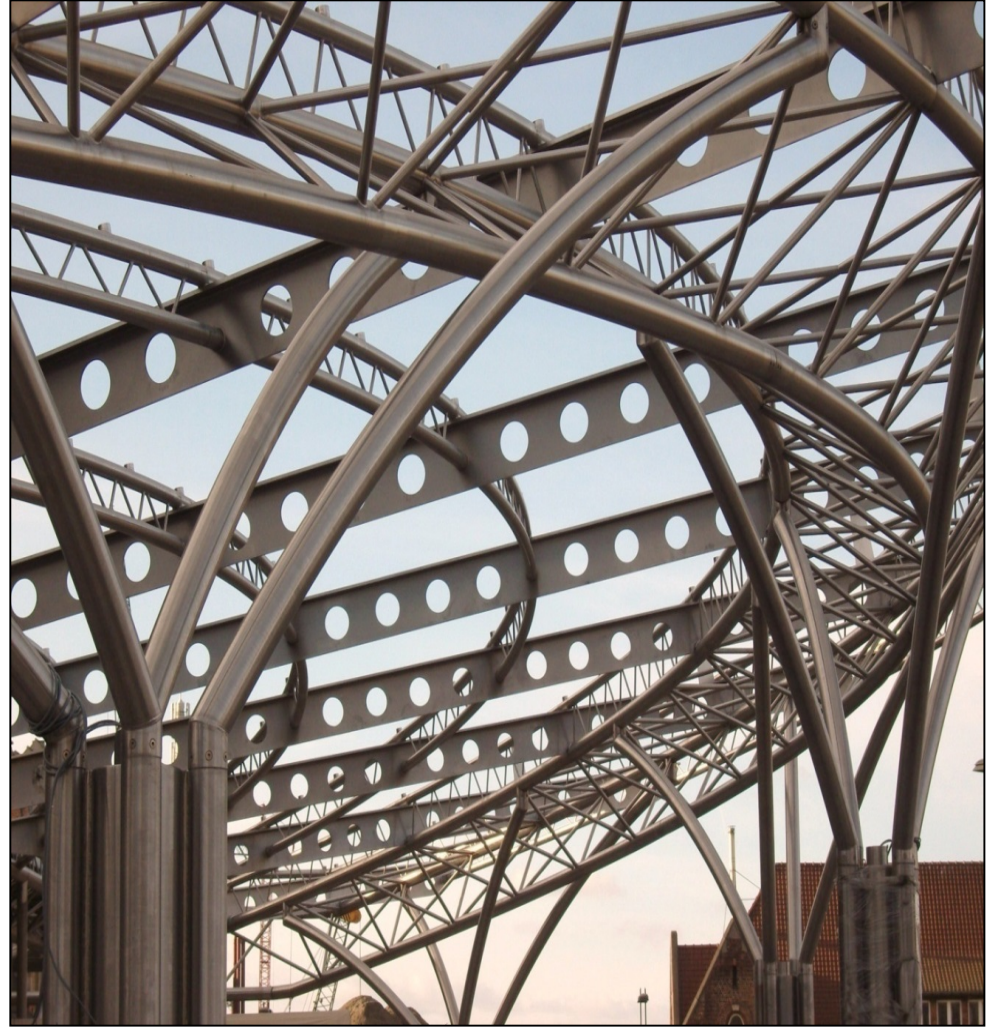
構造用途における採用事例

ゲント(ベルギー)

サンピエトロ駅

設計:Wefirna

施工:THV Van Laere-Braekel Aero





ブリュッセル

(ベルギー)

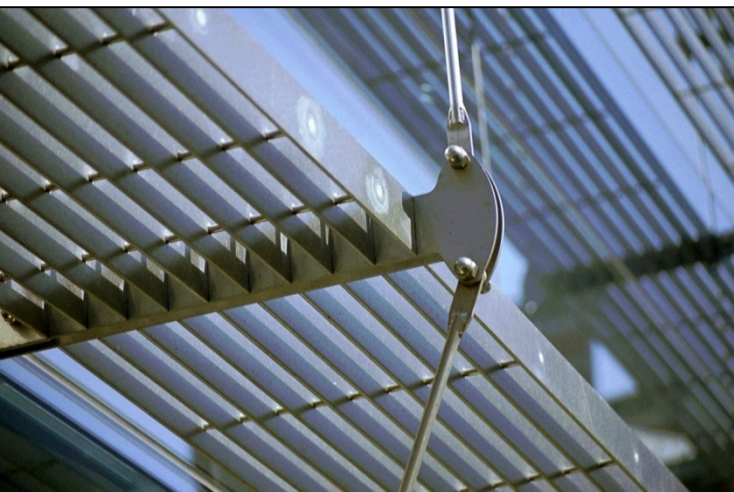
軍事学校

設計: AR.TE

施工:

Tractebel

Development



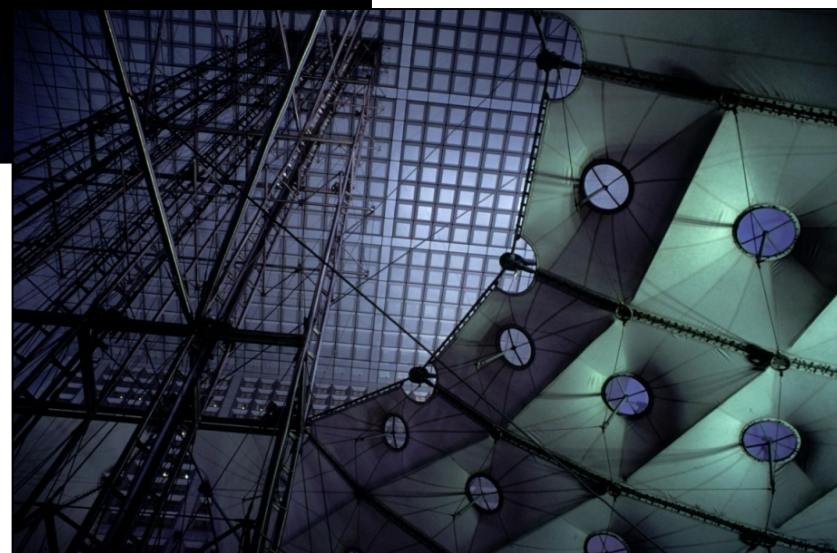


パリ(フランス)

La Grande Arche

設計 : Johan Otto von Spreckelsen

施工 : Paul Andreu





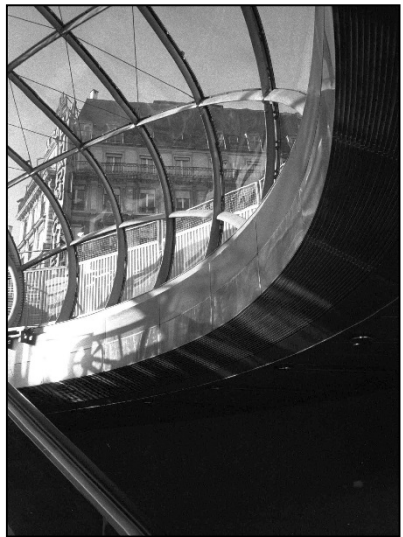
フィンランド
Villa Inox
(ステンレス村)

パリ(フランス)

La Lentille de Saint-Lazare

設計: Arte Charpentiers & Associés

施工: Mitsu Edwards



ポルト (ポルトガル) ポルト駅



ミラノ(イタリア)

Torno Internazionale S.P.A. 本社ビル

鋼種 : EN 1.4404 (AISI 316L)

設計 : Dante O. BENINI & Partners Architects



Photography : Toni Nicolino / Nicola Giacomini

原子力発電所におけるステンレス構造体



Photography: Stainless Structurals LLC

タンパ(USA)
ステンレスによる
外装サポート材



Photography: TriPyramid Structures, Inc.

ロンドン（イギリス）
テムズ川水門
ステンレスIビーム

Thames Gateway Water Treatment Works



Photography: Interserve

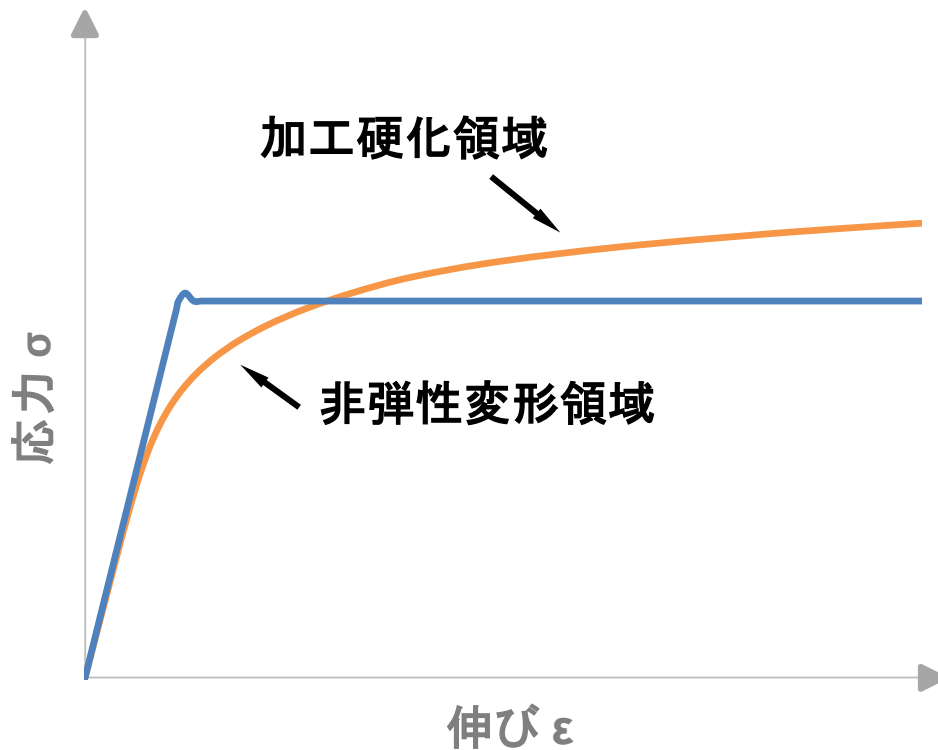


Section 2

材料の機械的特性

応力ひずみ曲線 (炭素鋼とステンレス鋼)

ステンレス鋼は炭素鋼とは異なる応力ひずみ特性を示す



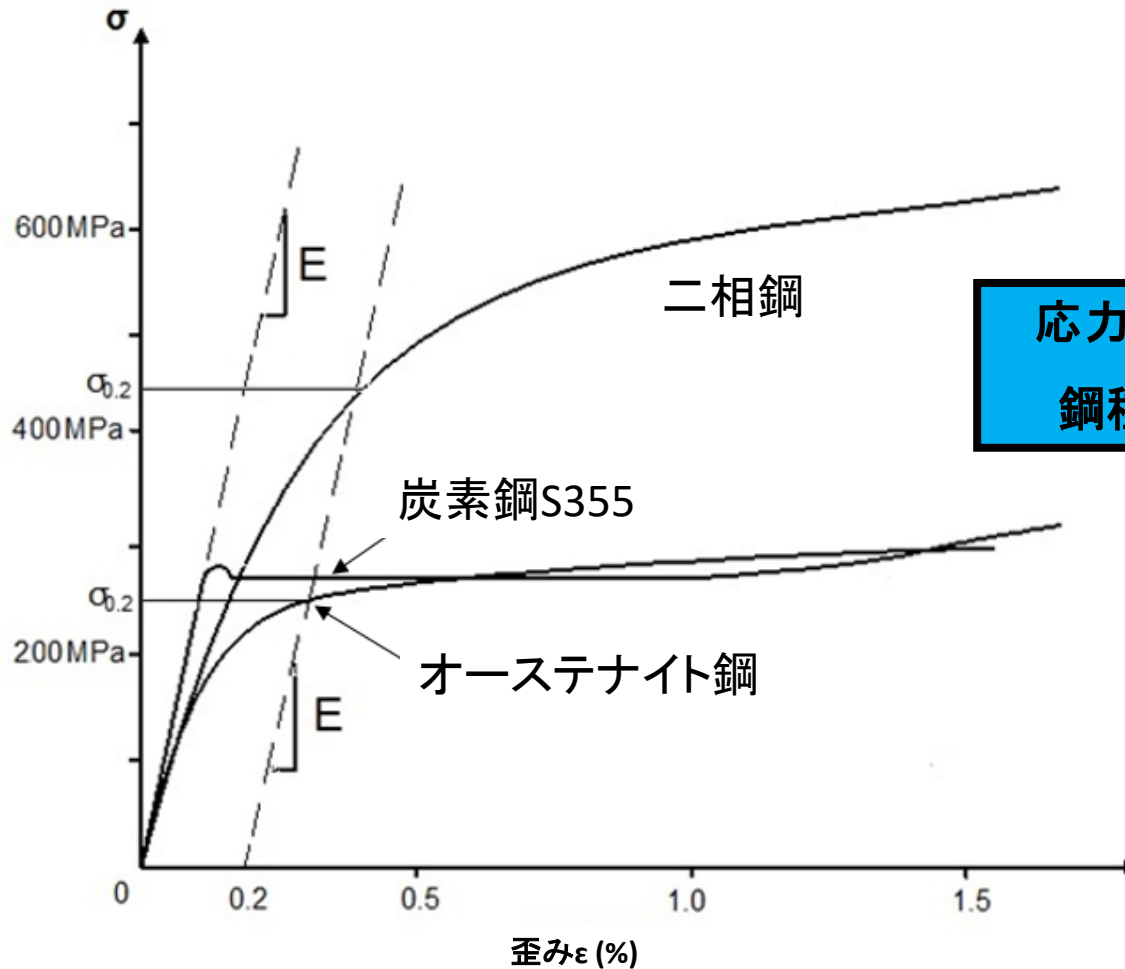
【炭素鋼】

- ・明確な降伏点を示す
- ・平坦な塑性変形挙動を示す

【ステンレス鋼】

- ・明確な降伏点が現れない
- ・高い加工硬化を示す

応力ひずみ曲線 (低ひずみ域)



応力-ひずみ特性は
鋼種により異なる

ステンレス鋼の降伏点設計

EN 10088-4 and -5などの規格にて
各ステンレス鋼の0.2%耐力の
数値が定義されている

オーステナイト系ステンレス鋼:

$$f_y = 220-350 \text{ MPa}$$

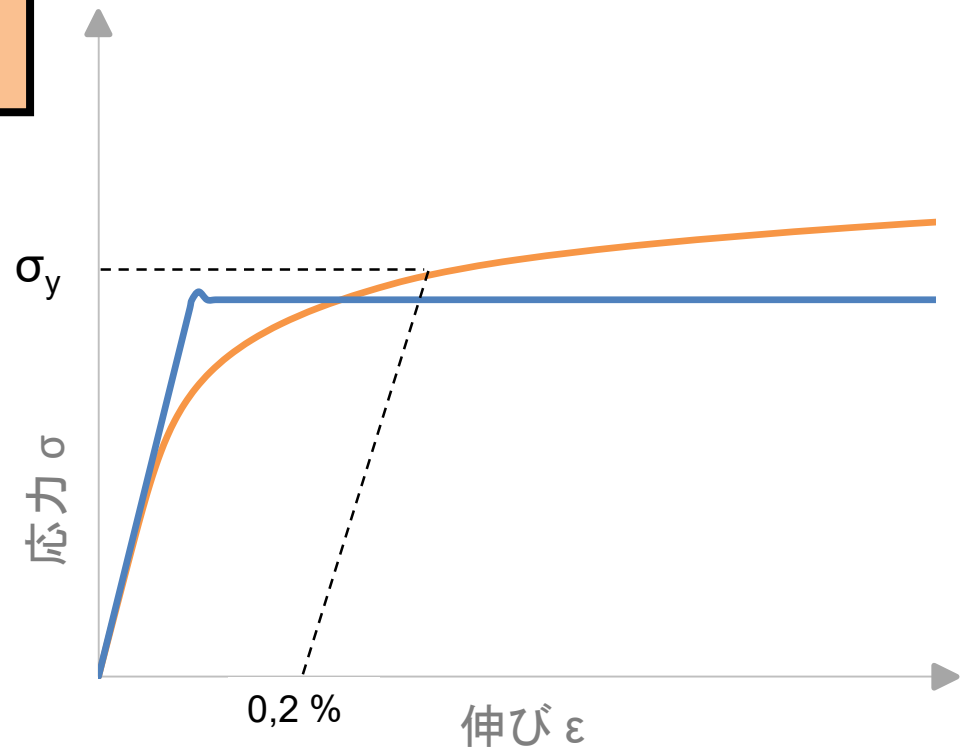
二相系ステンレス鋼:

$$f_y = 400-480 \text{ MPa}$$

フェライト系ステンレス鋼:

$$f_y = 210-280 \text{ MPa}$$

ヤング率: $E=200,000$ to $220,000$ MPa



ステンレス鋼の降伏点設計

鋼種	分類	0.2%耐力 (N/mm ²)	最大応力 (N/mm ²)	ヤング率 (N/mm ²)	破壊 ひずみ (%)
1.4301 (304)	オーステナイト	210	520	200000	45
1.4401 (316)	オーステナイト	220	520	200000	40
1.4062	二相鋼	450	650	200000	
1.4462	二相鋼	460	640	200000	
1.4003	フェライト	250	450	220000	

歪み硬化

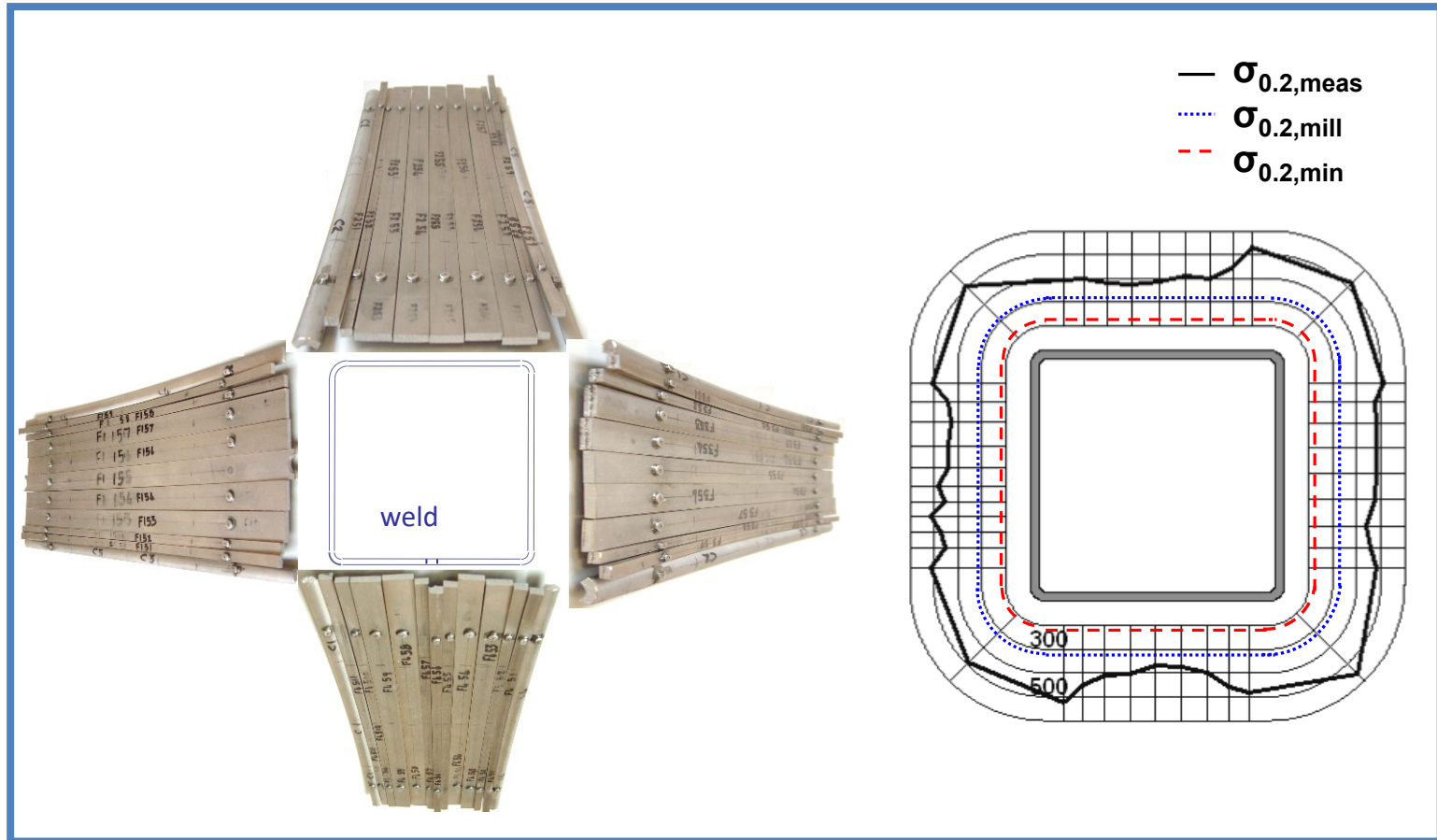
(加工硬化または冷間加工)

- 塑性変形により強度が上昇
- 生産または加工工程での冷間成形によるもの

角形鋼管の製造工程においては、冷間成形したコーナーの切断面で0.2%耐力が約50%上昇する

歪み硬化 (加工硬化または冷間加工)

- 加工工程における耐力の上昇



歪み硬化 常に有用とは限らない

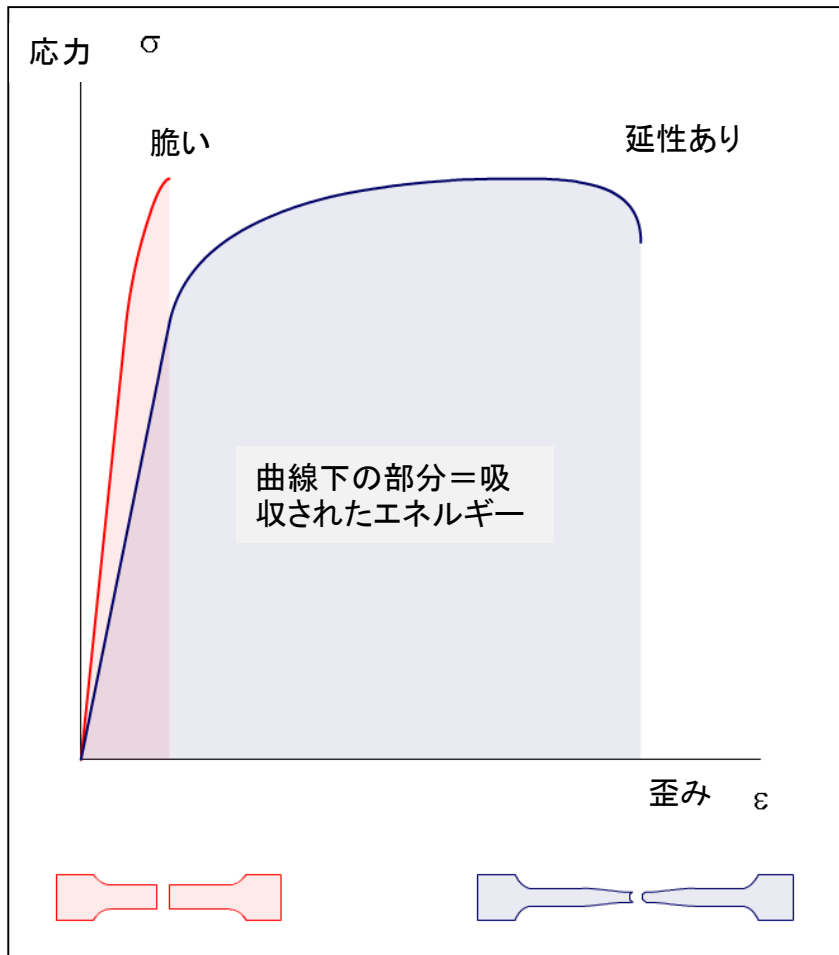
理由は:

- 製造設備の大型化
- 加工に必要な負荷の上昇
- 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)

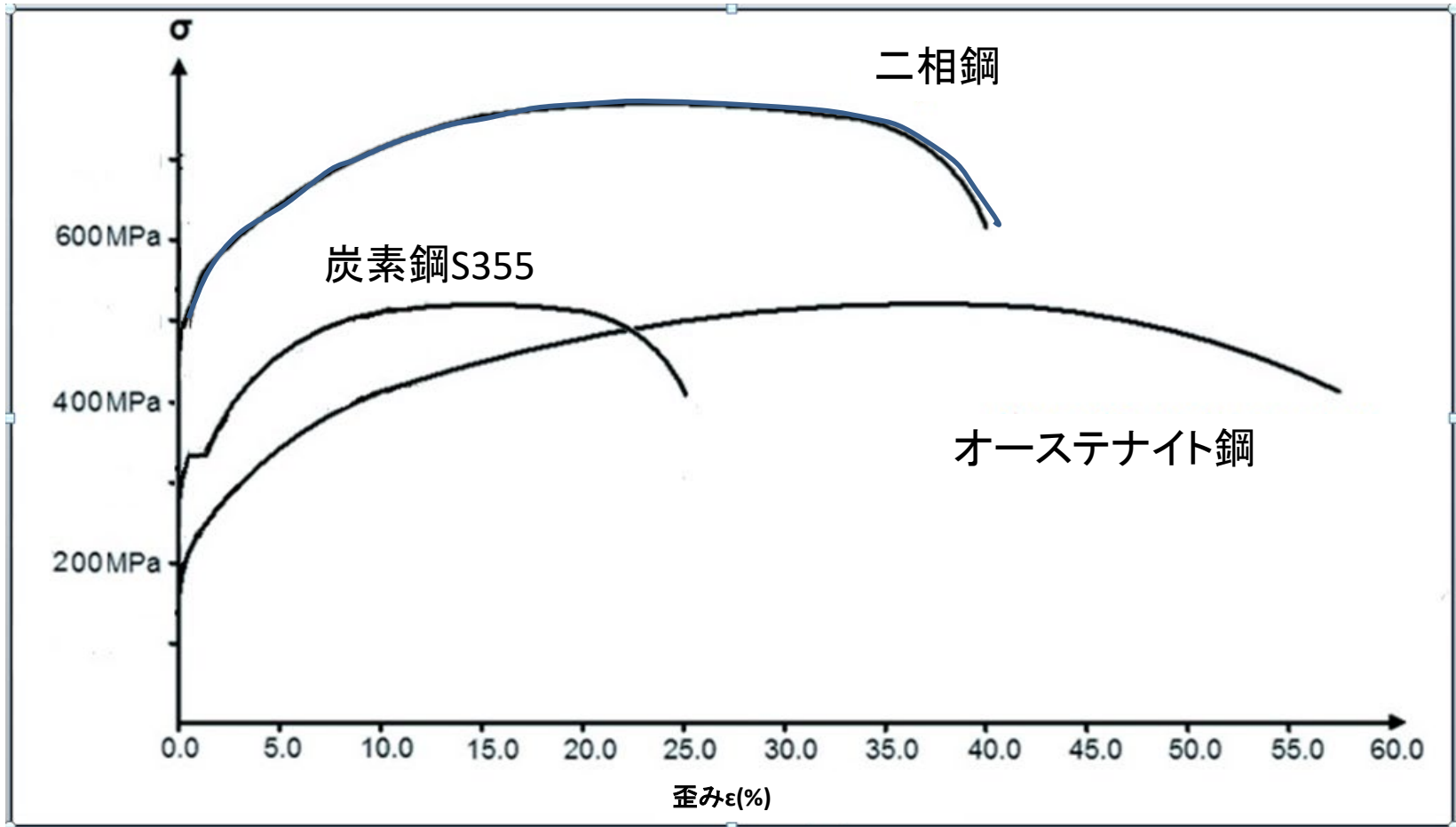
- 望ましくない残存応力の発生

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

応力ひずみ曲線 (高ひずみ域)

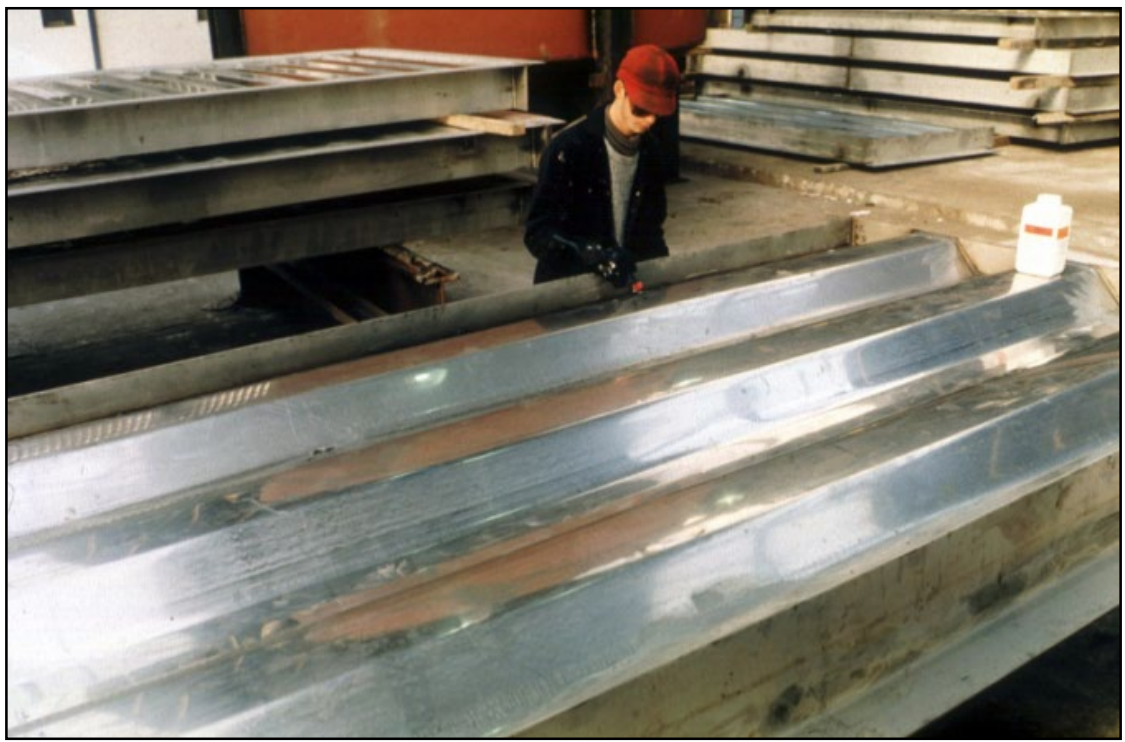




耐衝撃／衝突建造物



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

非線形性による影響

- 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

座屈性能への影響

- 細長比 : 低

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

ステンレス鋼の性能は炭素鋼と同等

- 細長比 : 高

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鋼も炭素鋼に類似した挙動を示し、同様の幾何学的大よび残存応力を示す

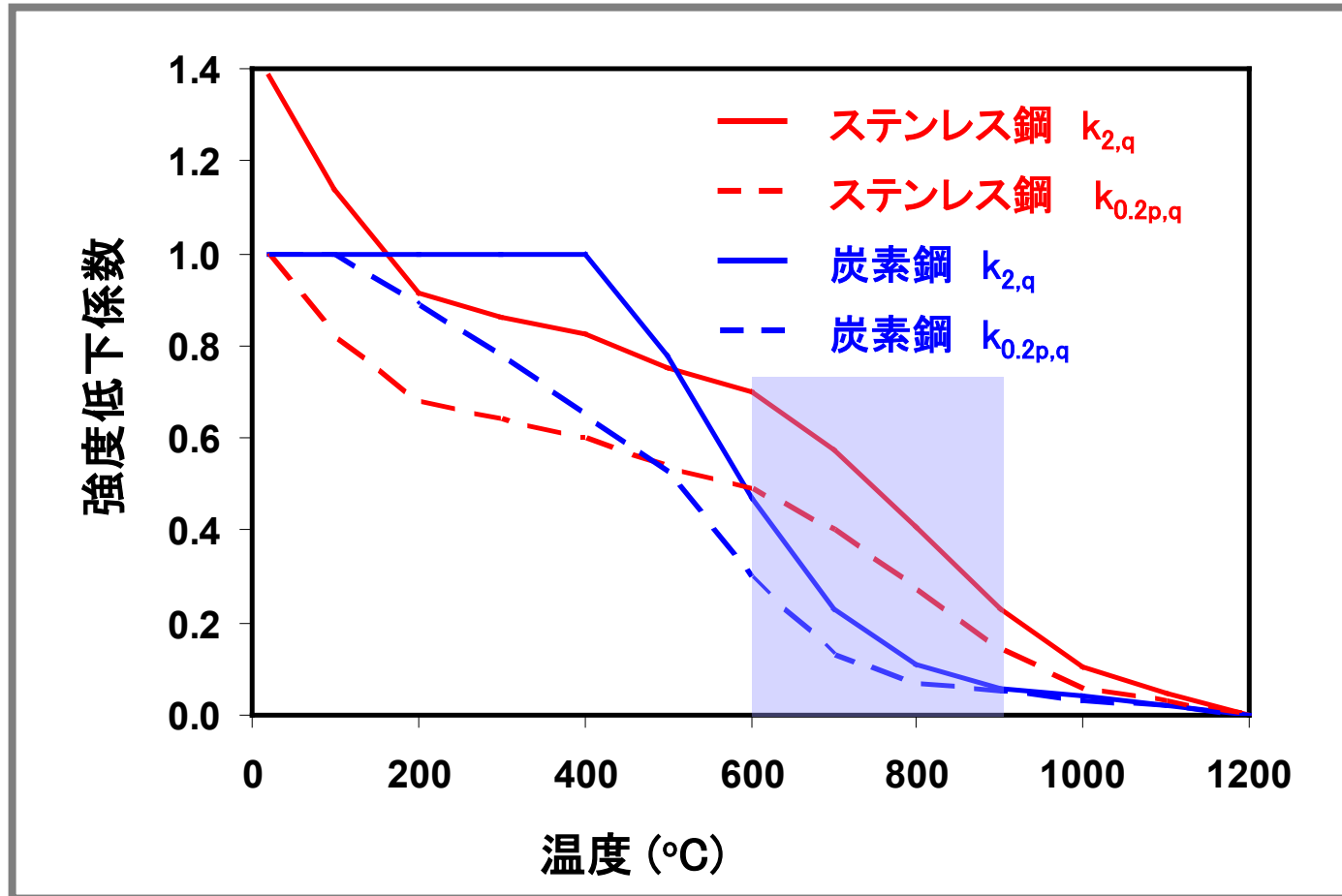
座屈性能への影響

- 細長比 : 中間程度

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

ステンレスの柱は炭素鋼ほど強くはない

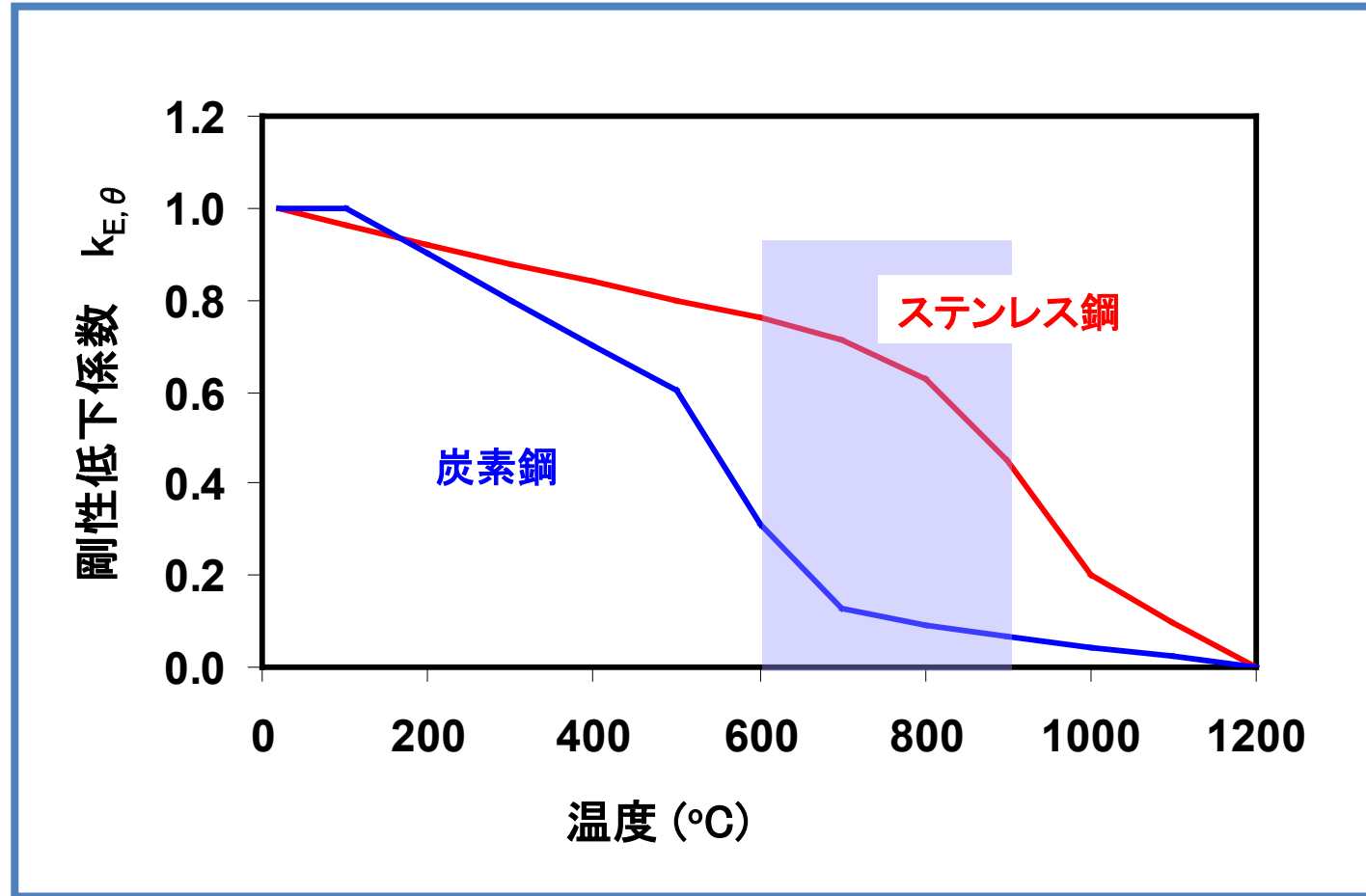
高温条件下での材料特性



$k_{0.2p,q}$ = 0.2%耐力における強度低下係数

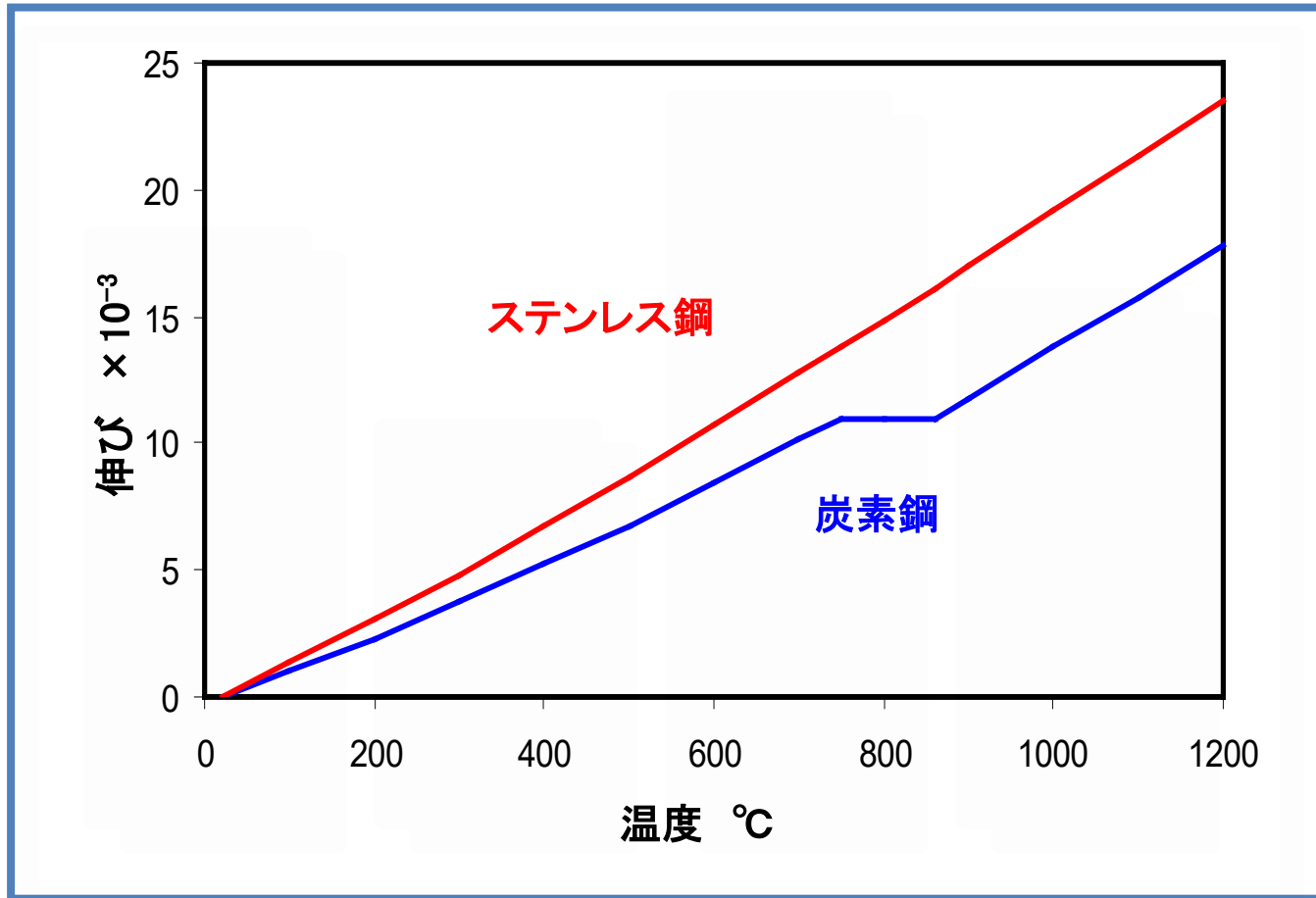
$k_{2,q}$ = 総ひずみ2%における強度低下係数

高温条件下での材料特性



剛性低下係数

高温条件下での材料特性



熱膨張



Section 3

Eurocode3に基づいた設計



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

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

ユーロコード(Eurocodes)間の相互関係

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 ステンレス鋼

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 張力部材を含む建造物の設計

EN1993-1-12 高張力鋼に関する補則

Eurocode 3: Part1-4

ステンレスに関する補足規定

BRITISH STANDARD

BS EN
1993-1-4:2006

Eurocode 3 — Design of steel structures —

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

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

ICS 91.040.01; 91.080.10

BSi
British Standards

鉄鋼構造物の設計

ステンレスに関する補足規定 (2006)

- Eurocode3に記載されている炭素鋼の規定を必要に応じ修正、補足
- 建物、橋梁、タンク等に適用される

Eurocode 3: Part1-4

ステンレスに関する補足規定

- 基本的方法は炭素鋼と同じものを用いる
- 張力を要する組立部材や梁についても炭素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、以下の理由により異なる方法を用いる
 - 非線形性応力歪み特性
 - 歪み硬化特性
 - 残存応力の違い

Eurocode 3: 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

分類	Eurocode 3-1-4	次改訂版 (予定)
フェライト系	3	3
オーステナイト系	16	16
二相系	2	6

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: Part1-4

ステンレスに関する補足規定

ステンレスの設計
規格は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

断面分類と局部座屈の表現

- 限界幅、厚み比率が炭素鋼に比べて低い
- 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

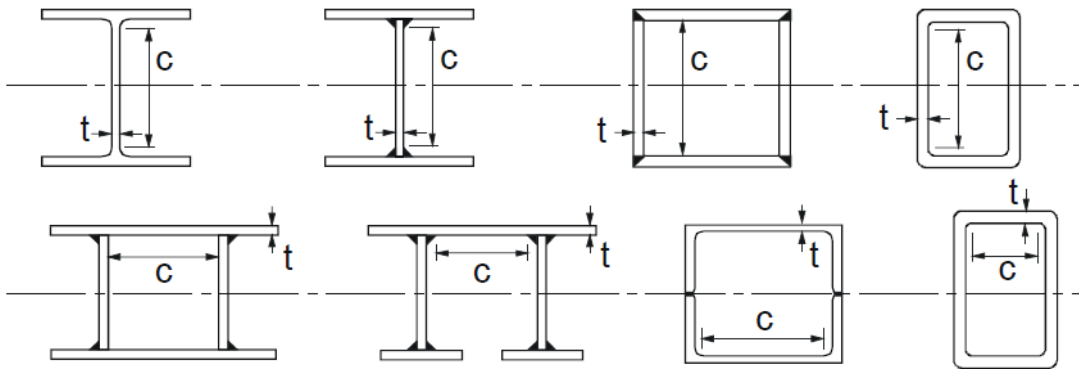
但し、

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

EN1993-1-4

断面分類と局部座屈の表現

- 内部補強材



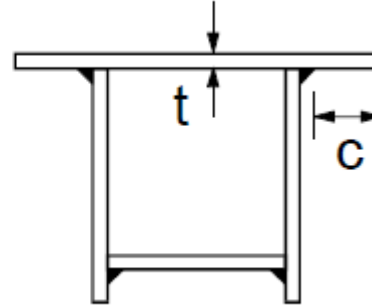
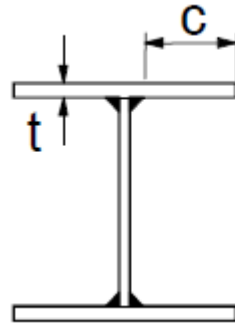
$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}}$$

Class	Eurocode 3-1-1: 炭素鋼		Eurocode 3-1-4: ステンレス鋼		次改訂版 (予定)	
	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮	曲げ	圧縮
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	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74.8\varepsilon$	$c/t \leq 30.7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$

EN1993-1-4

断面分類と局部座屈の表現

- 外部補強材



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

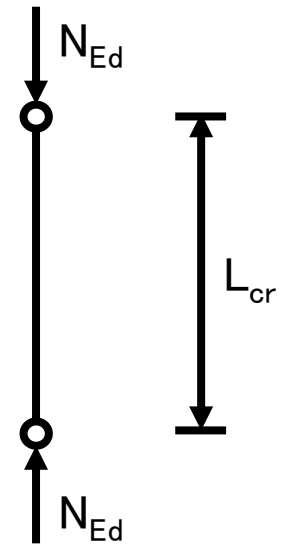
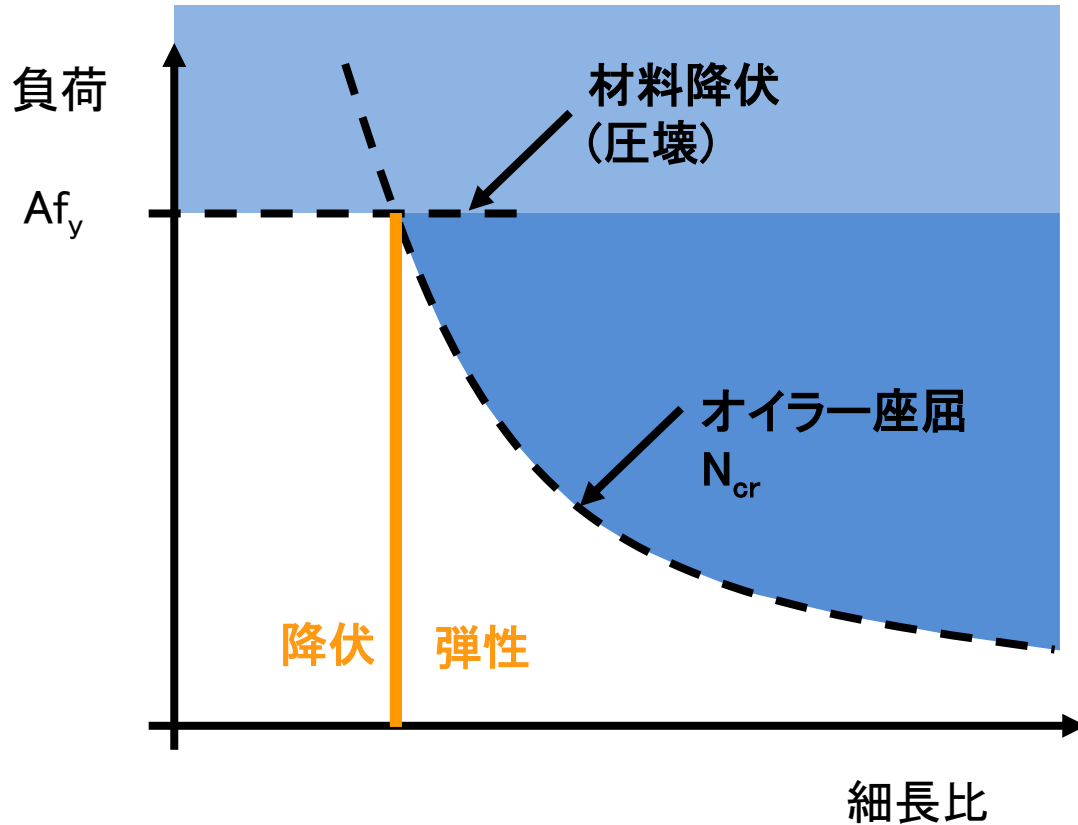
Class	Eurocode 3-1-1 炭素鋼	Eurocode 3-1-4 ステンレス鋼		次改訂版 (予定)
	圧縮	圧縮(溶接構造)	圧縮(曲げ構造)	圧縮
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq 9\epsilon$
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq 9.4\epsilon$	$c/t \leq 10.4\epsilon$	$c/t \leq 10\epsilon$
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 11\epsilon$	$c/t \leq 11.9\epsilon$	$c/t \leq 14\epsilon$

張力部材、柱および梁の設計

- 一般的に炭素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)

“理想的な”柱構造挙動

2つの限界：降伏限界と座屈限界



柱材の座屈現象

圧縮応力に対する座屈抵抗 : $N_{b,Rd}$

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

Class 1, 2 and 3

抵抗係数

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

Class 4 (対照)

柱材の座屈現象

細長比(無次元級数): $\bar{\lambda}$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad \text{Class 1、2、3の断面構造}$$

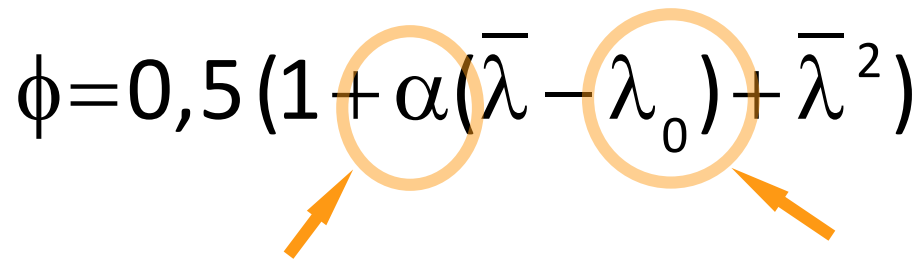
$$= \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{cr}}} \quad \text{Class 4の断面構造}$$

N_{cr} : 断面の全体的な特性による座屈モードにおける
弾性限界座屈荷重

柱材の座屈現象

減少係数 : χ

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

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


不確定要素

平坦部長さ

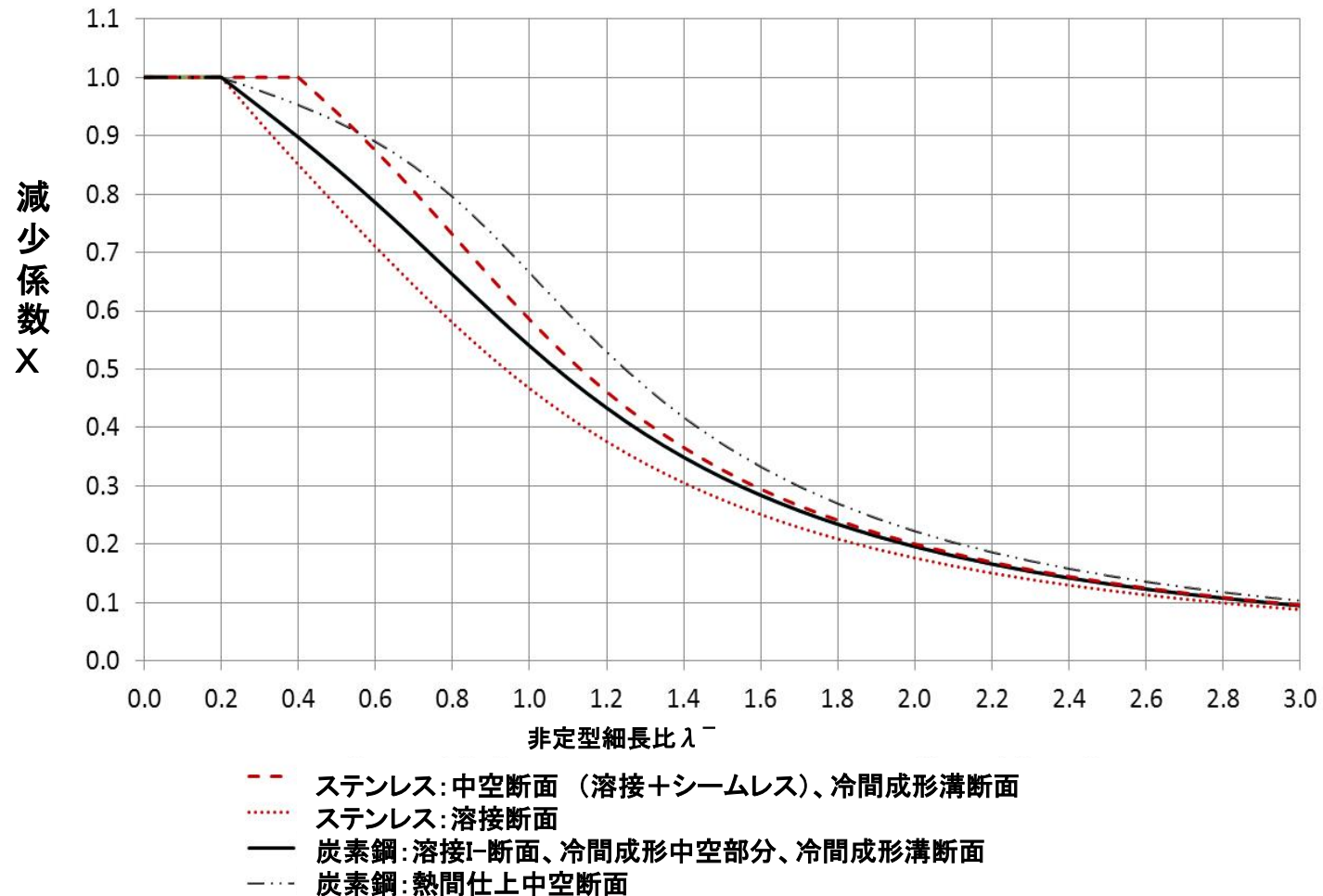
柱材の座屈現象

座屈曲線の選択は断面形状、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

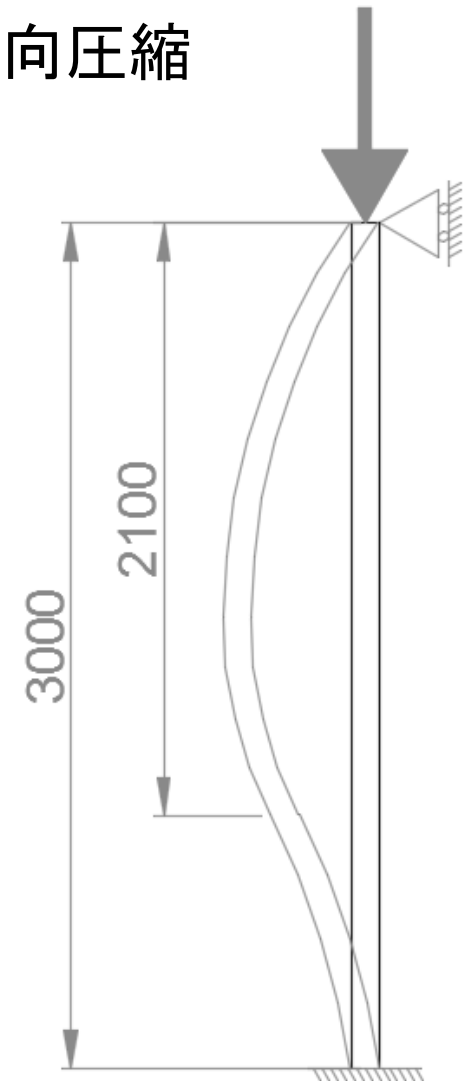
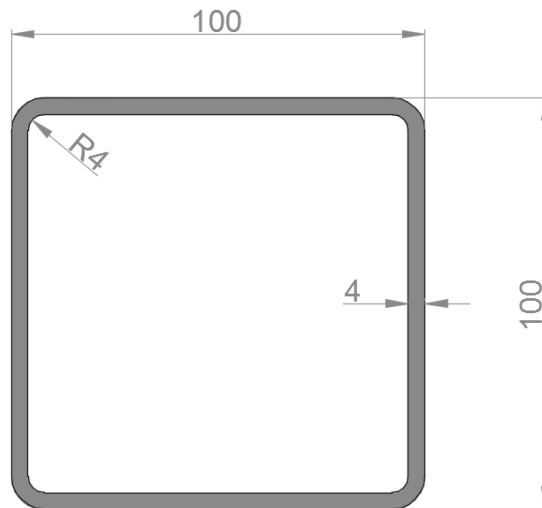
Eurocode3 曲げ座屈曲線



Eurocode3 曲げ座屈 事例

- 冷間成形された角形鋼管における同心円方向圧縮

	炭素鋼	オーステナイト系ステンレス鋼
材料	S235	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	235	230
E [N/mm ²]	210000	200000



Eurocode3 曲げ座屈 事例

- Eurocode 3-1-1
S235 (炭素鋼)

- 分類

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

全ての内部構造

$$c/t = 21 < 33 = 33\varepsilon$$

Class 1

断面構造 = class 1

- Eurocode 3-1-4
オーステナイト系ステンレス鋼

- 分類

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0.99$$

全ての内部構造

$$c/t = 21 < 25.35 = 25.7\varepsilon$$

Class 1

断面構造 = class 1

Eurocode3 曲げ座屈 事例

	Eurocode 3-1-1 S355	Eurocode 3-1-4 二相系ステンレス鋼
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

Eurocode3 曲げ座屈 事例

• 比較

	Eurocode 3-1-1 S235 (炭素鋼)	Eurocode 3-1-4 オーステナイト系ステンレス鋼
f_y [N/mm ²]	235	230
γ_{M0} [-]	1,0	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1
断面構造 $N_{c,Rd}$ [kN]	351	313
安定性 $N_{b,Rd}$ [kN]	281	277

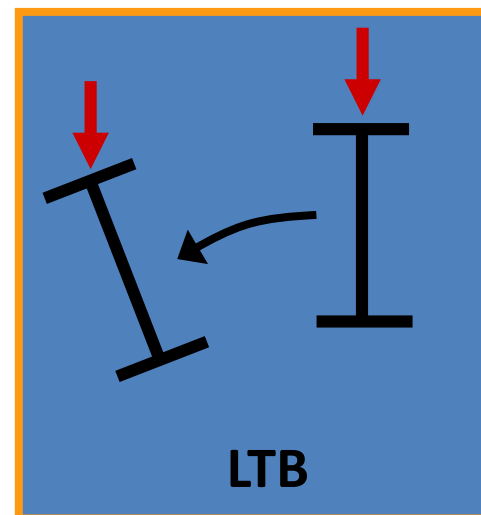
この事例においては、炭素鋼とステンレス鋼が同等の座屈抵抗を示す

⇒ ひずみ硬化の優位性が示されておらず、現在のEurocode3-1-4では、ひずみ硬化の影響が考慮されているとは言えない

水平ねじれ座屈現象

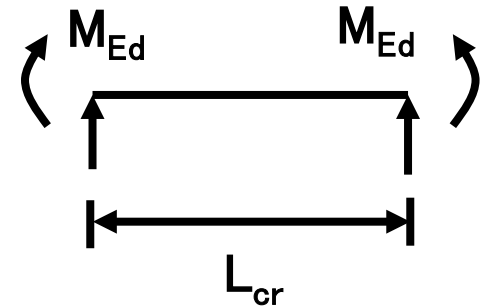
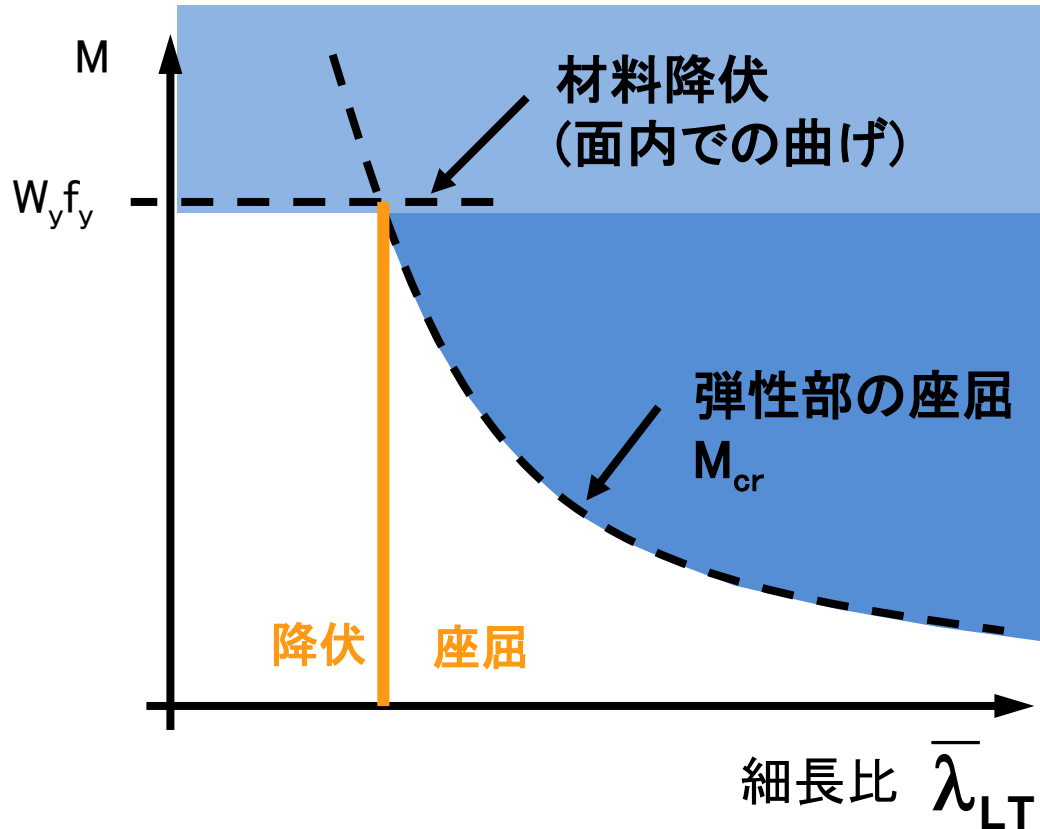
以下の条件下では、
水平ねじれ座屈現象
を軽減することができる

- 対称軸曲げ
- CHS, SHS, 棒鋼(丸、角)
- 完全に水平方向に拘束された梁
- $\bar{\lambda}_{LT} < 0.4$



水平ねじれ座屈現象

- 水平ねじれ座屈の設計は、柱の座屈現象と類似している



水平ねじれ座屈現象

水平方向に拘束されていない梁（またはその一端）における座屈抵抗 : $M_{b,Rd}$

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

水平ねじれ梁 低減係数

水平ねじれ座屈現象

水平ねじれ座屈曲線の計算式

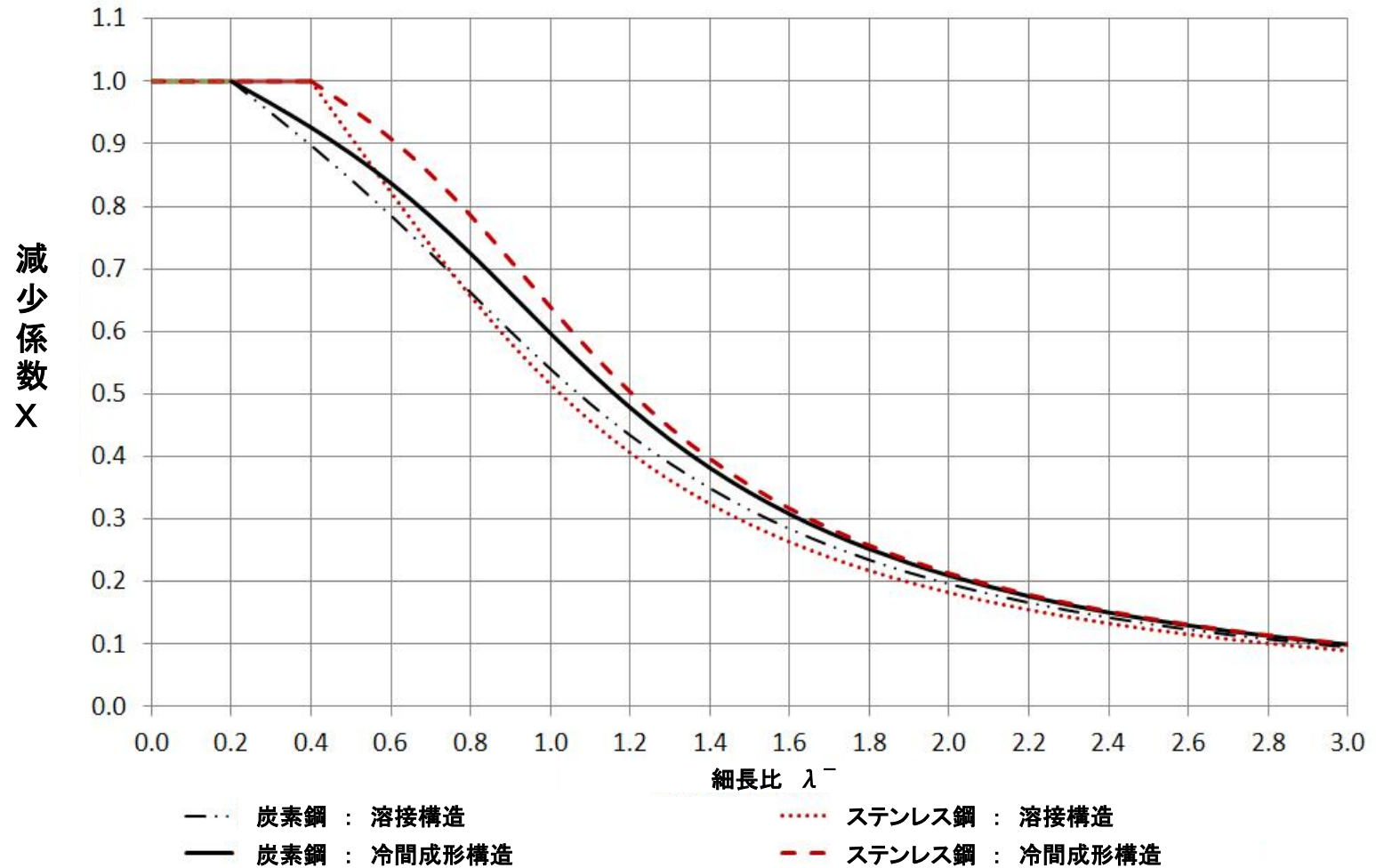
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{but } \chi_{LT} \leq 1.0$$

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

不確定要素

平坦部長さ

Eurocode3 水平ねじれ座屈カーブ



細長比（無次元級数）

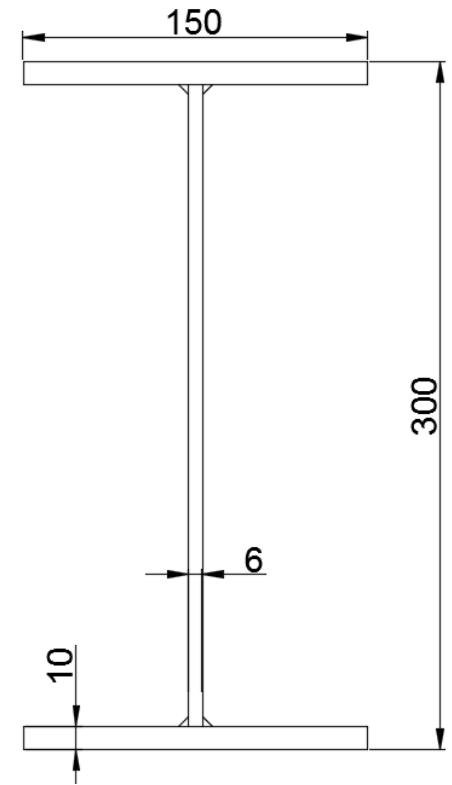
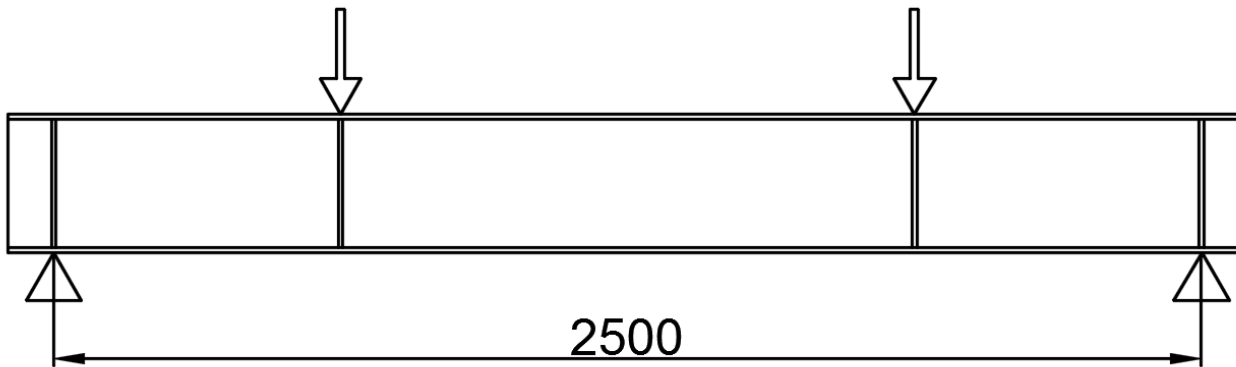
水平ねじれ座屈における細長比

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

- 圧縮荷重座屈曲線（除く a_0 曲線）
- W_y 分類に応じた係数
- M_{cr} 弾性限界LTBモーメント

Eurocode 3 水平ねじれ座屈 事例

- I ビームにおける曲げ



	炭素鋼	二相系ステンレス鋼
材料	S355	EN 1.4162
f_y [N/mm ²]	355	450
E [N/mm ²]	210000	200000

Eurocode 3 水平ねじれ座屈 事例

- Eurocode 3-1-1:

炭素鋼 (S355)

- 分類

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.81$$

- フランジ

$$c/t = 6.78 < 7.3 = 9\varepsilon$$

Class 1

- ウェブ

$$c/t = 45.3 < 58.3 = 72\varepsilon$$

Class 1

断面構造 = class 1

- Eurocode 3-1-4:

二相系ステンレス鋼

- 分類

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} = 0.71$$

- フランジ

$$c/t = 6.78 < 7.76 = 11\varepsilon$$

Class 3

- ウェブ

$$c/t = 45.3 < 58.3 = 72\varepsilon$$

Class 3

断面構造 = class 3

Eurocode 3 水平ねじれ座屈 事例

- Eurocode 3-1-1:
炭素鋼 (S355)

- 限界モーメント

Class 1

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

$$= 196 \text{ kNm}$$

- Eurocode 3-1-4:
二相系ステンレス鋼

- 限界モーメント

Class 3

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

$$= 202 \text{ kNm}$$

- 次改訂版(予定)Eurocode 3-1-4
- 分類上、炭素鋼に近くなる

断面構造 = class 2

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

Eurocode 3 水平ねじれ座屈 事例

弾性限界座屈モーメント:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left[\left(\frac{k_z}{k_\omega} \right)^2 \frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_T}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]} - C_2 z_g \right\}$$

	Eurocode 3-1-1: 炭素鋼 (S355)	Eurocode 3-1-4: 二相系ステンレス鋼
C_1 [-]	1,04	1,04
C_2 [-]	0,42	0,42
k_z [-]	1	1
k_ω [-]	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_ω [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

Eurocode 3 水平ねじれ座屈 事例

水平ねじれ座屈抵抗

	Eurocode 3-1-1: 炭素鋼 (S355)	Eurocode 3-1-4: 二相系ステンレス鋼	Eurocode 3-1-4: 次改訂版(案)
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

Eurocode 3 水平ねじれ座屈 事例

■ 比較

	Eurocode 3-1-1: 炭素鋼 S355	Eurocode 3-1-4: 二相系ステンレス鋼	Eurocode 3-1-4: 次改訂版(案)
f_y [N/mm ²]	355	450	450
γ_{M0} [-]	1,0	1,1	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
断面構造 $M_{c,Rd}$	196	202	226
安定性 $M_{b,Rd}$	111	99	103

この事例では、炭素鋼とステンレス鋼が水平ねじれ座屈抵抗において、近い結果を示した。しかし、最近の実験や文献によると、Eurocode3-1-4による結果が実測に近いことが指摘されている
 ⇒ 非常に保守・消極的発想である
 (これは有限要素法による解析例に示されています)



Section 4

代替方法

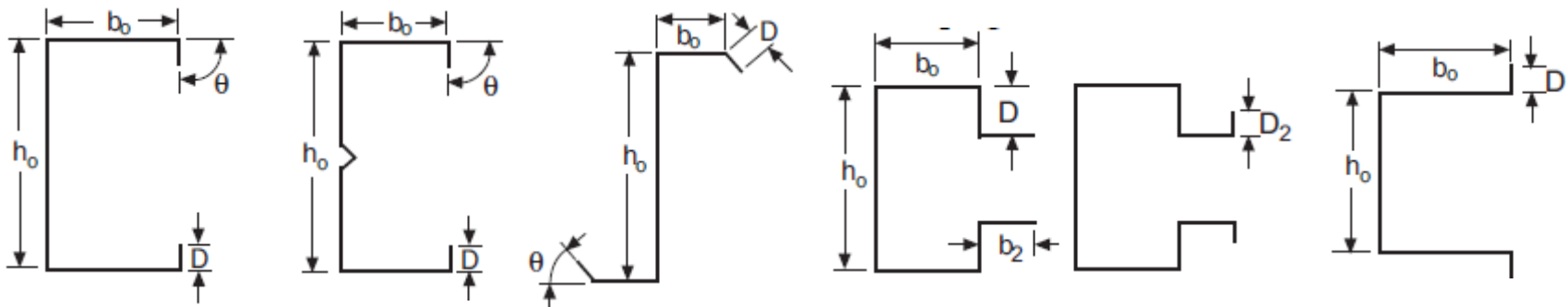
代替方法

- 直接強度計算法 DSM(Direct Strength Method)
 - 米国基準の一部流用
 - 厚板向けの手法
- 連続強度計算法 CSM(Continuous strength method)
 - ひずみ硬化の影響を含む
- 有限要素法 FEM(Finite Element Model)
 - 算出に時間を要する
 - 全ての要素を計算モデルに含めることができる

直接強度計算法

DSM (Direct Strength Method)

- AISI規格の付表1に掲載
- 単純明快な手法
- 厚板壁面に適用される



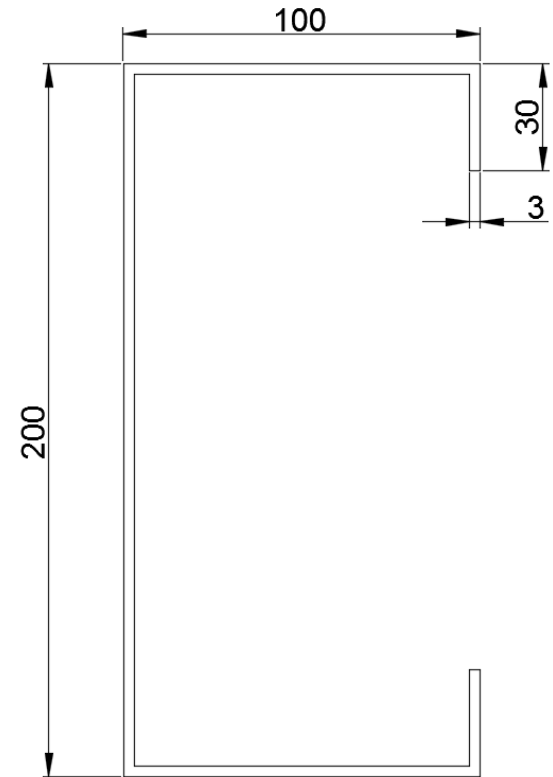
- しかし、“弾性座屈解析”が要求される
 - 文献に掲載されている理論的な方法
 - 有限ストリップ解析 (例 CUFSM)
- 詳細リンク先 : <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

直接強度計算法 事例

DSM (Direct Strength Method)

- 垂直C型鋼の圧縮
 - 単純拘束の柱構造
 - 柱高さ: 5m

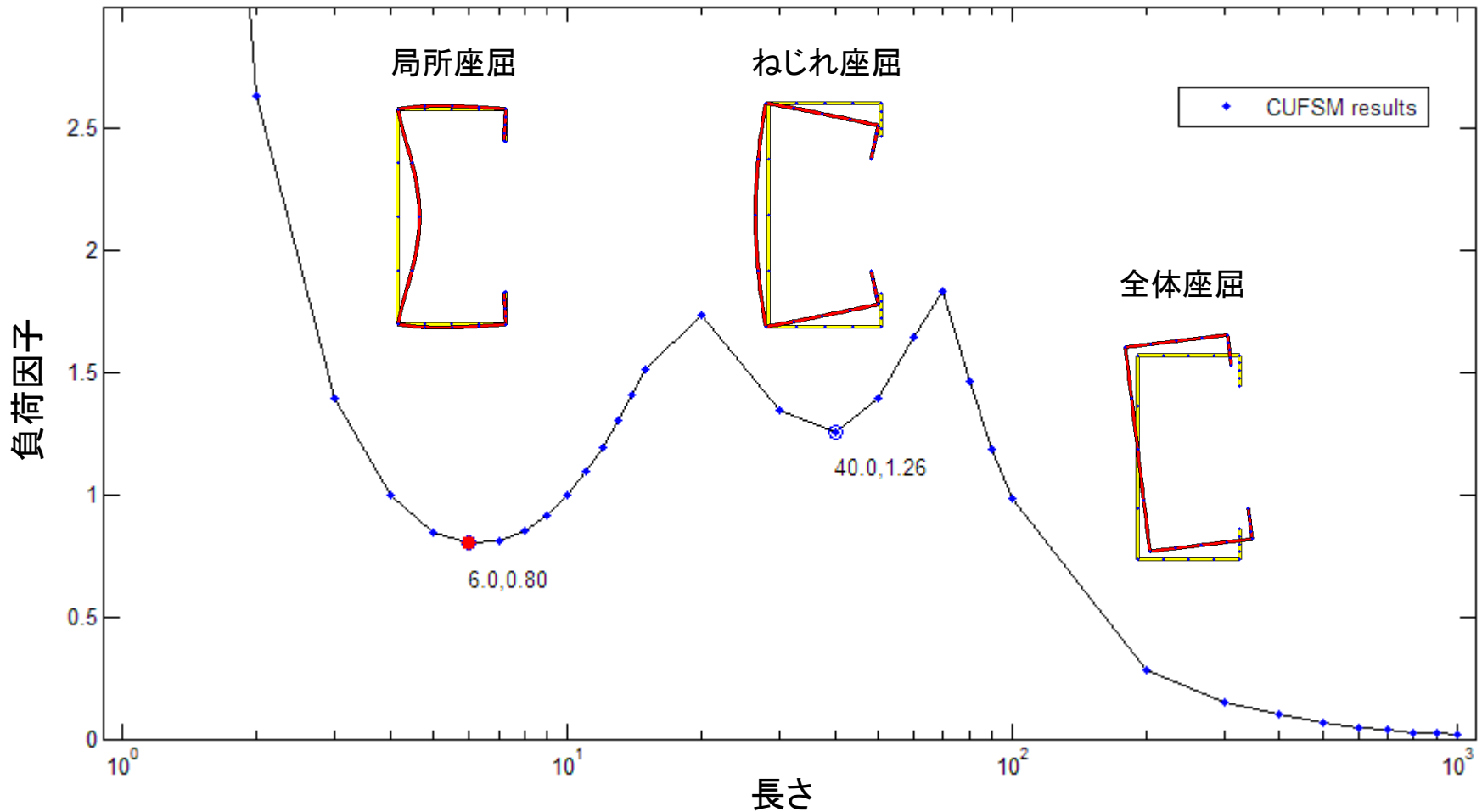
	フェライト系ステンレス鋼
材料	EN 1.4003
f_y [N/mm ²]	280
f_u [N/mm ²]	450
E [N/mm ²]	220000



直接強度計算法 事例

DSM (Direct Strength Method)

■ ステップ1 : 弾性座屈解析



直接強度計算法 事例

DSM (Direct Strength Method)

■ 解析結果 = “ 弾性限界座屈荷重 ”

本事例における弾性座屈解析の荷重因子は次に等しい

- 局部座屈荷重 : 0.80
- ねじれ座屈荷重 : 1.26
- 全体座屈荷重 : 0.28

■ ステップ2 : 公称強度の計算

- 局部座屈 → 1方程式
- ねじれ座屈 → 1方程式
- 全体座屈 → 1方程式

直接強度計算法

DSM (Direct Strength Method)

- 公称局所座屈強度 P_{nl}

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

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

For $\lambda_l \leq 0,776$

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

For $\lambda_l > 0,776$

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

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

直接強度計算法

DSM (Direct Strength Method)

- 公称ねじれ座屈強度 P_{nd}

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

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

For $\lambda_d \leq 0,561$

$$P_{nd} = P_y$$

For $\lambda_d > 0,561$

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

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

直接強度計算法

DSM (Direct Strength Method)

- 公称全体座屈強度 P_{ne}

- $\lambda_c = \sqrt{P_y/P_{cre}} = 1,88$

- $P_y = Af_y = 376 \text{ kN}$

- $P_{cre} = 0,28 * 376 = 107 \text{ kN}$

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

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

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

直接強度計算法

DSM (Direct Strength Method)

- ステップ3 :

同軸座屈抵抗はこれらの最小値に等しい

- 局所座屈 : $P_{nl} = 93.81 \text{ kN}$
- ねじれ座屈 : $P_{nd} = 344.56 \text{ kN}$
- 全体座屈 : $P_{ne} = 93.81 \text{ kN}$

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

連続強度計算法

CSM (Continuous Strength Method)

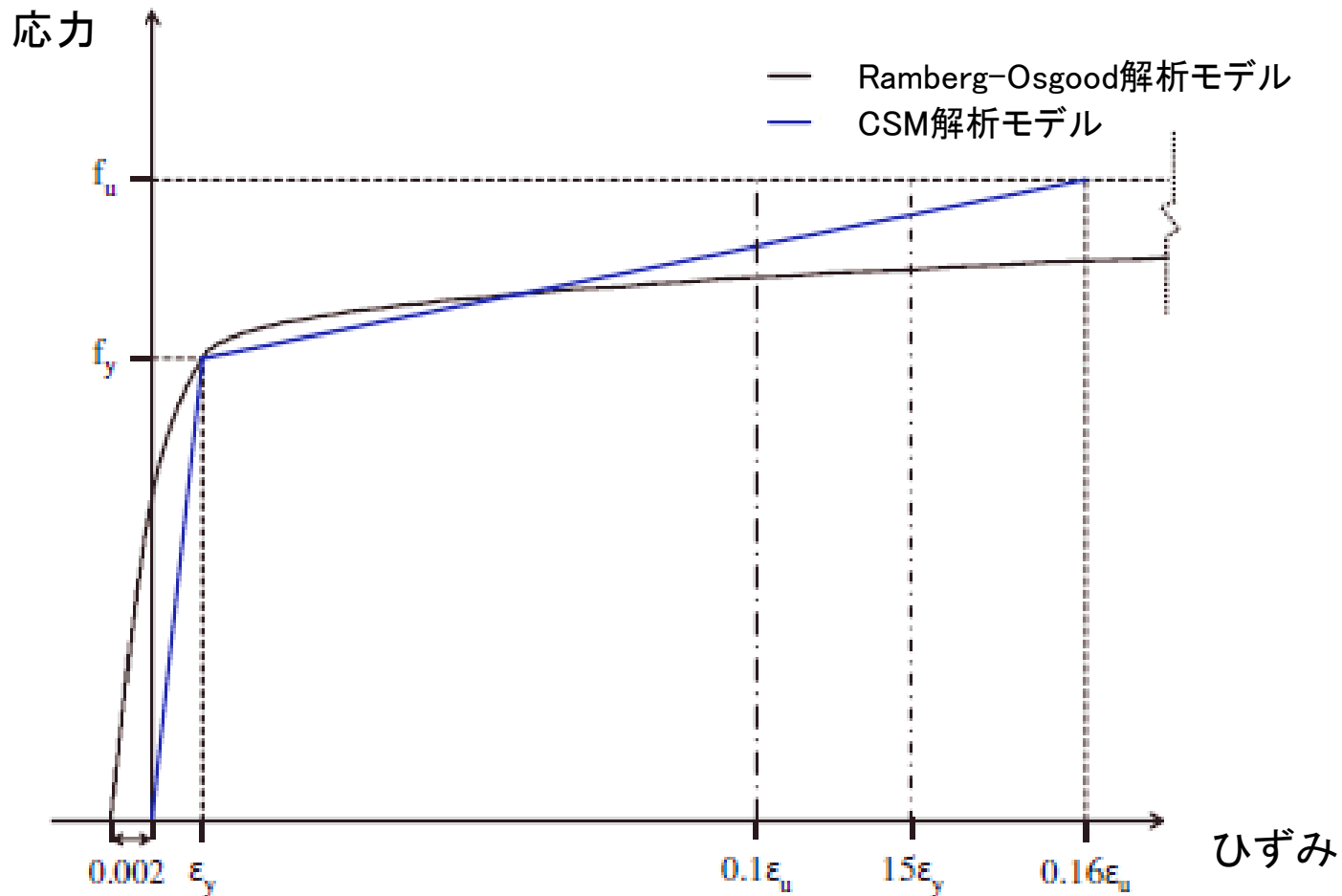
- ステンレス鋼の特徴
 - 非線形的材料構造
 - 高いひずみ硬化現象
 - 定型的な手法では断面構造の全挙動を考慮できない

連続強度計算法では
ひずみ硬化を考慮した
モデル解析を実施

連続強度計算法

CSM (Continuous Strength Method)

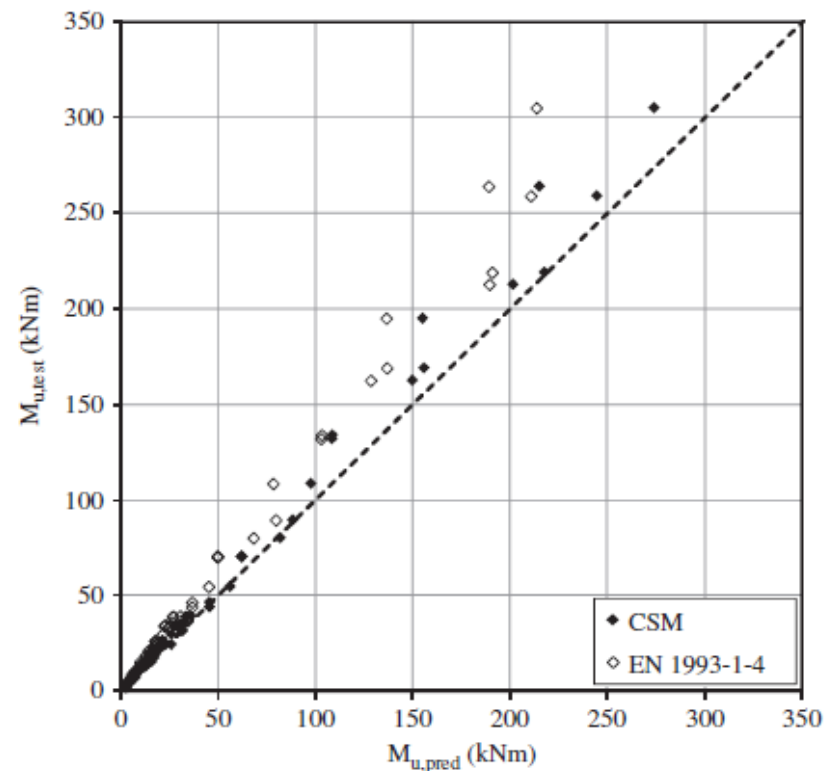
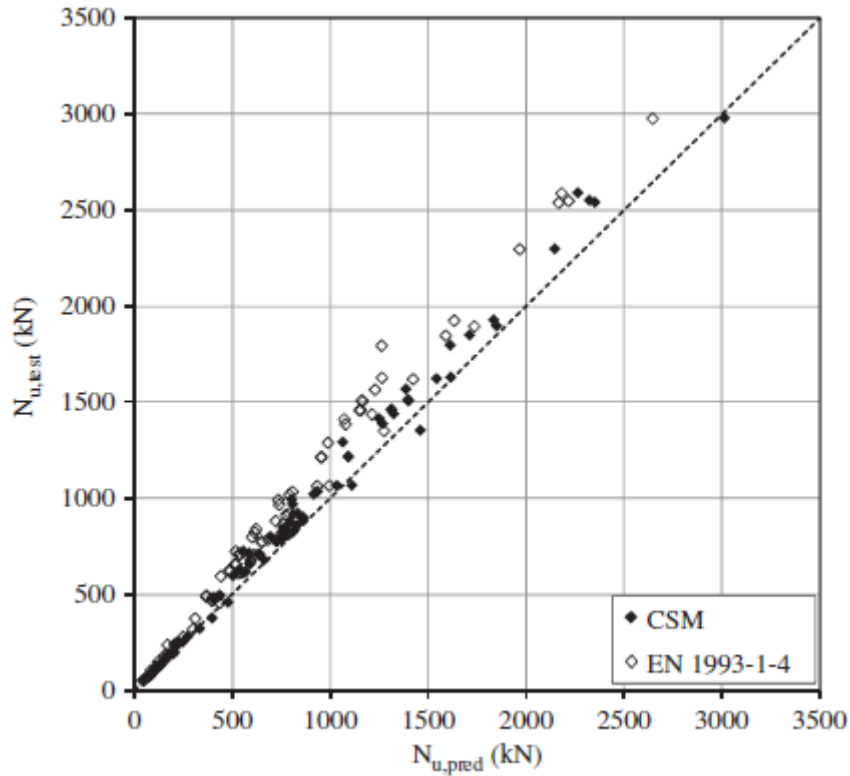
CSMを考慮した材料モデル



連続強度計算法

CSM (Continuous Strength Method)

- Eurocode3とCSMにおける解析と実測の対比
 - 圧縮系
 - 曲げ系



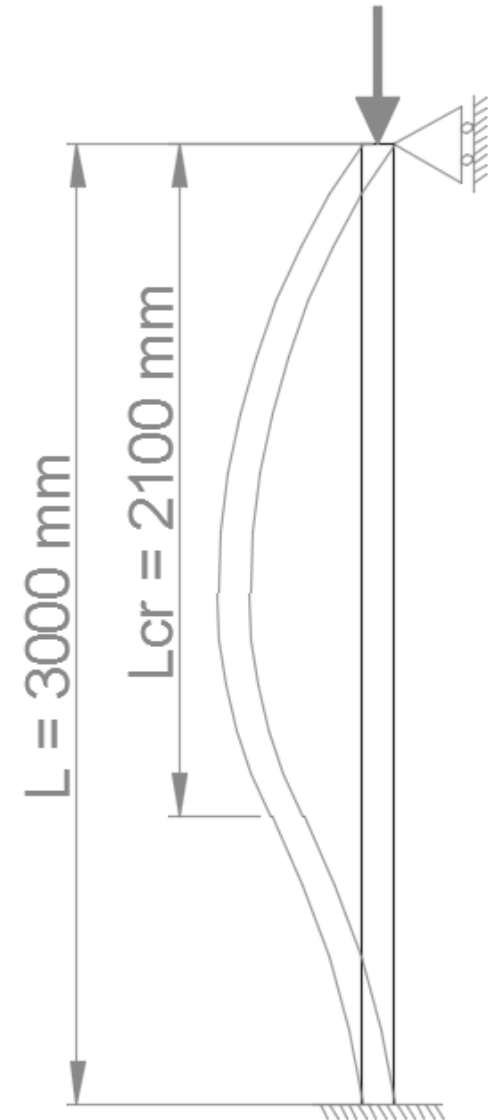
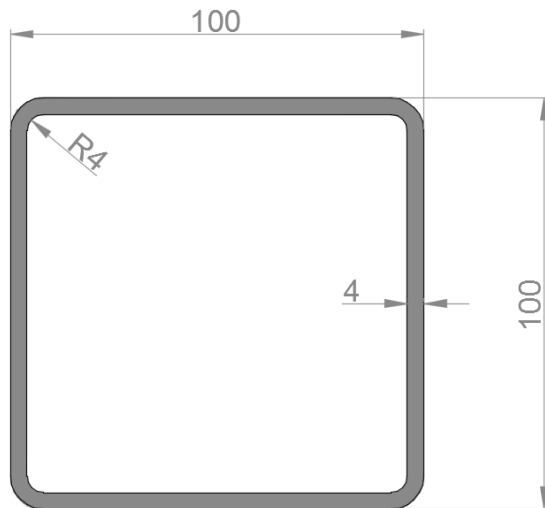
CSM解析の方がより正確に断面構造の挙動を示す

連続強度計算法 湾曲座屈例

CSM (Continuous Strength Method)

- 冷間成形された角形鋼管における同心円方向圧縮モデル (P.51と同例)

オーステナイト系ステンレス	
材料	EN 1.4301
f_y [N/mm ²]	230
E [N/mm ²]	200000



連続強度計算法 湾曲座屈例

CSM (Continuous Strength Method)

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

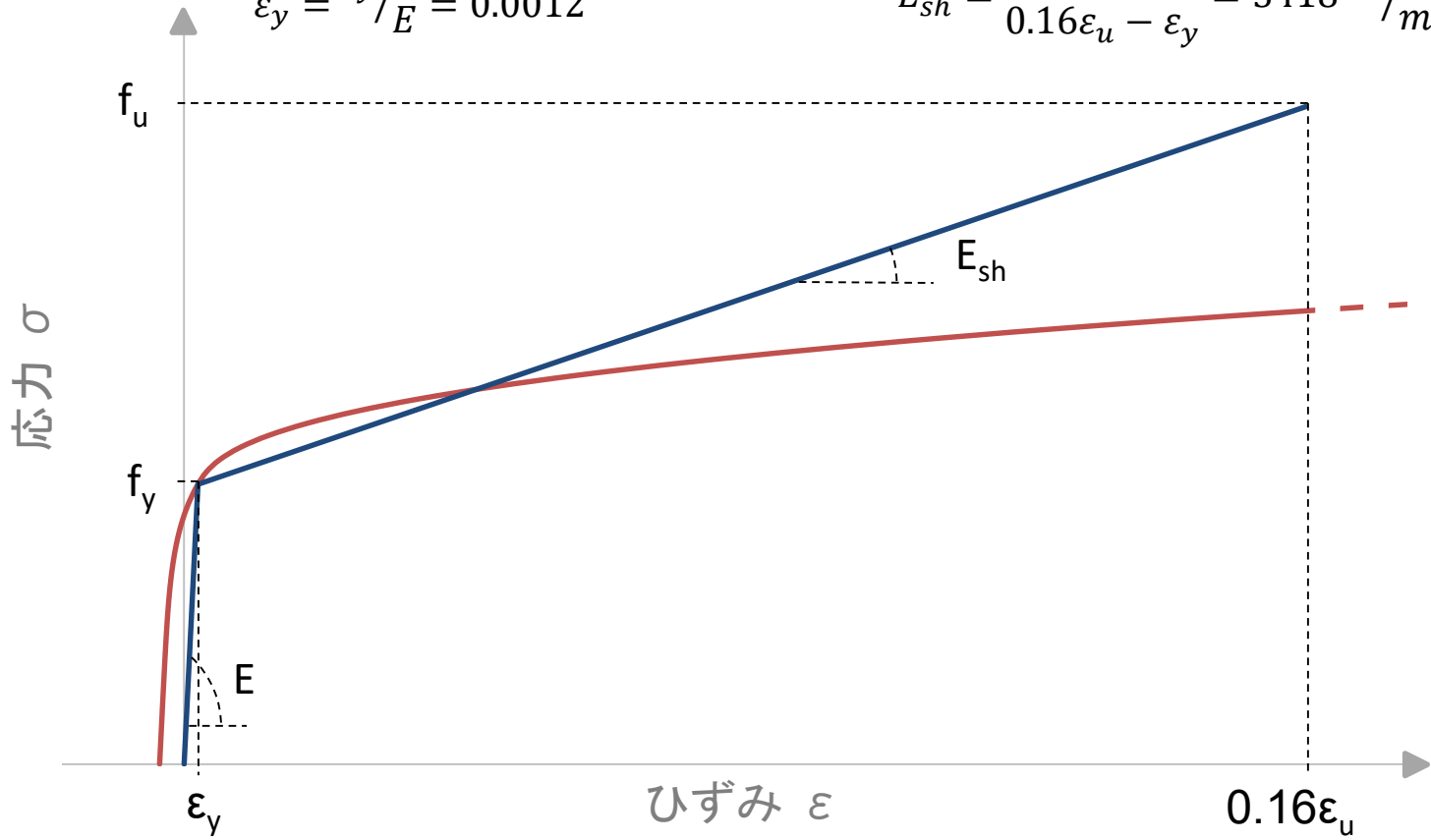
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_y = f_y / E = 0.0012$$

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

$$0.16\varepsilon_u = 0.16(1 - f_y/f_u) = 0.919$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = 3418 \text{ N/mm}^2$$



連続強度計算法 湾曲座屈例

CSM (Continuous Strength Method)

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

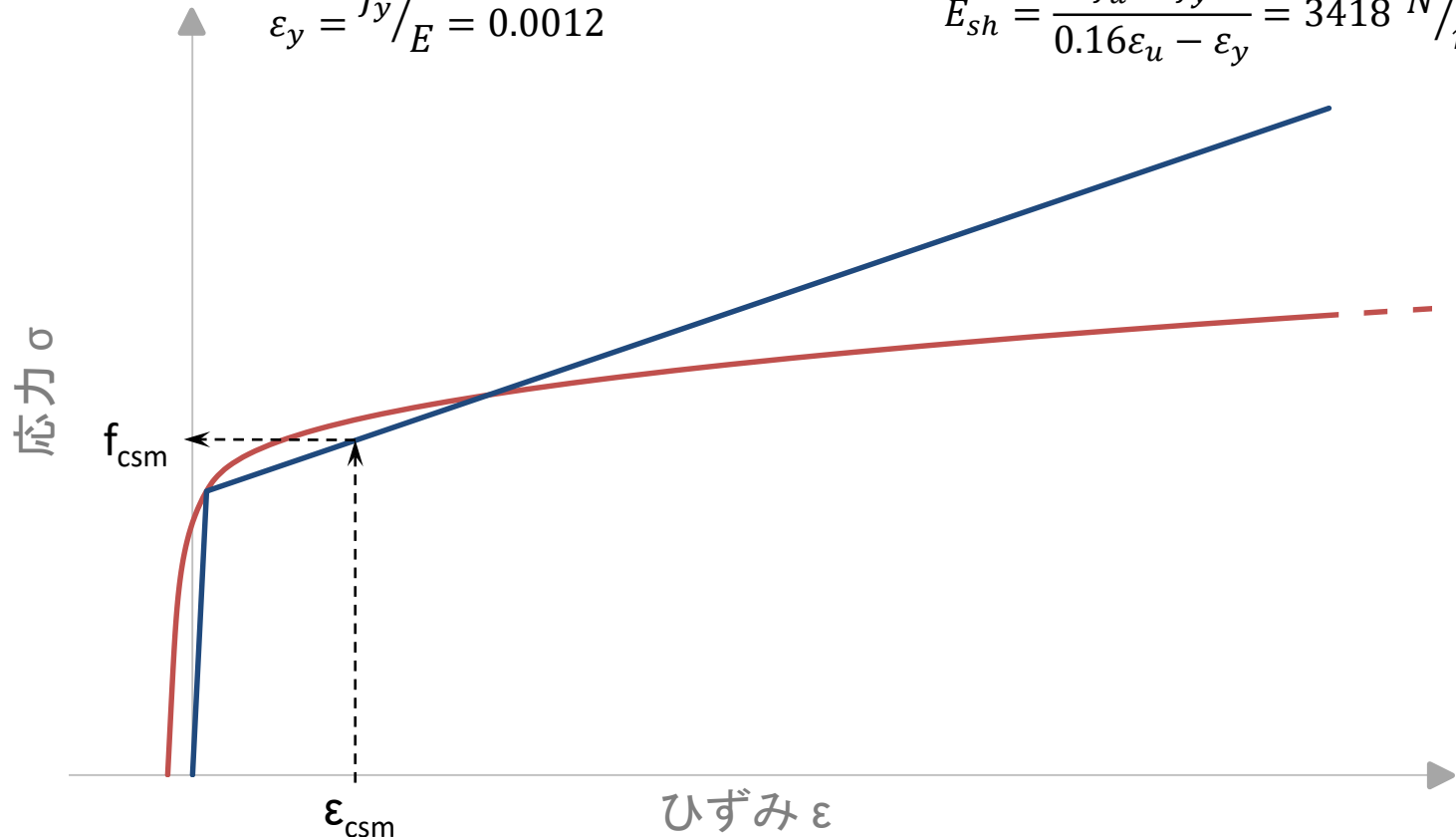
$$E = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_y = f_y / E = 0.0012$$

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

$$0.16\varepsilon_u = 0.16(1 - f_y/f_u) = 0.0919$$

$$E_{sh} = \frac{f_u - f_y}{0.16\varepsilon_u - \varepsilon_y} = 3418 \text{ N/mm}^2$$



連続強度計算法 湾曲座屈例

CSM (Continuous Strength Method)

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

- $\sigma_{cr,cs}$ = 総合作用を加味した総断面における弾性座屈荷重

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

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

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

連続強度計算法 湾曲座屈例

CSM (Continuous Strength Method)

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

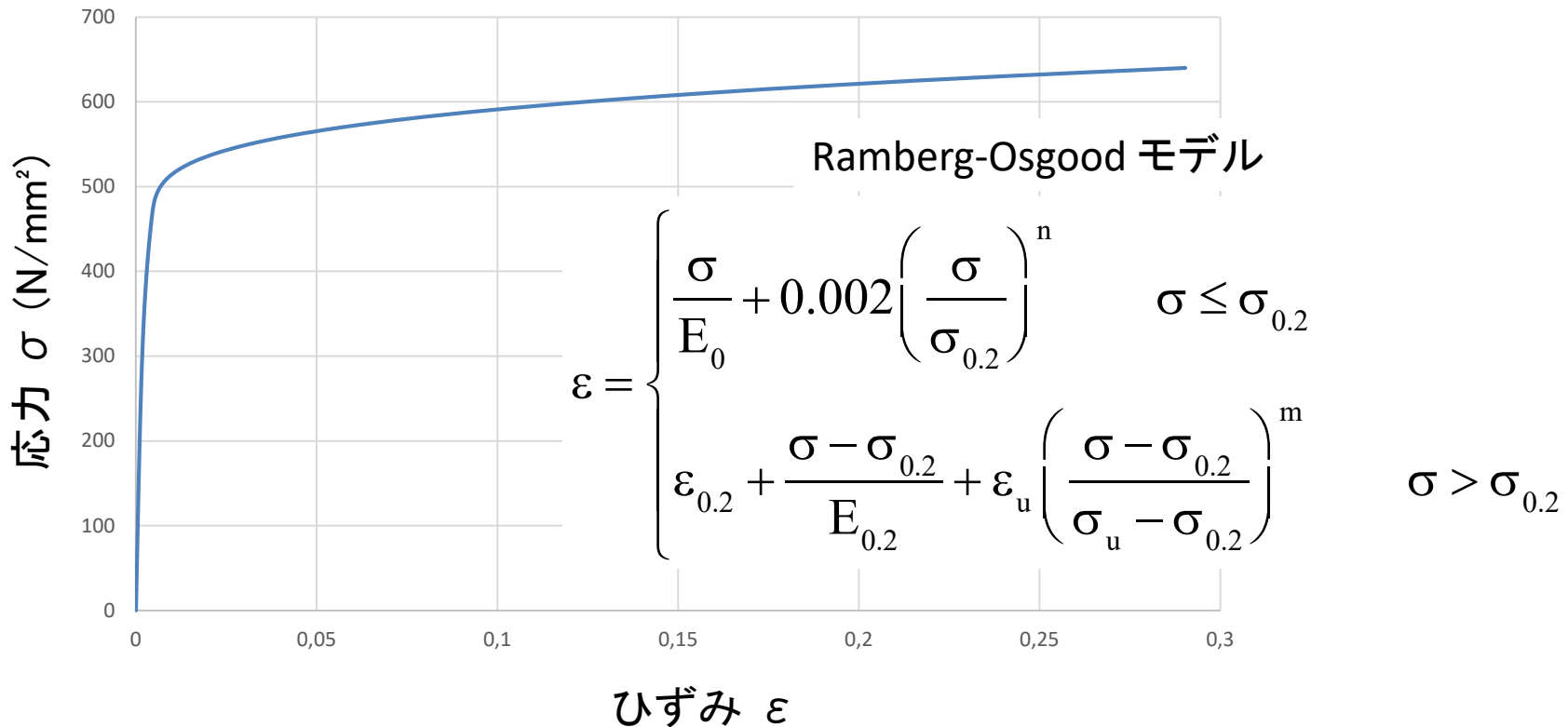
	Eurocode 3-1-1: 炭素鋼 (S235)	CSM: オーステナイト系ステン ス鋼	Eurocode 3-1-4: オーステナイト系ステン ス鋼
f_y [N/mm ²]	235	230	230
γ_{M0} [-]	1,0	1,1	1,1
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
断面形状 $N_{c,Rd}$ [kN]	351	335	313
安定性 $N_{b,Rd}$ [kN]	281	294	277

有限要素法

FEM (Finite Element Model)

材料の応力ひずみ曲線は正確に示される

(例えばRamberg-Osgoodモデルや引張試験の実測値など)



有限要素法

FEM (Finite Element Model)

- 非線形因子は以下の式で表される
(Rasmussenの式)

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

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

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} = \begin{cases} 0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0} \\ \frac{0.2 + 185 \frac{\sigma_{0.2}}{E_0}}{1 - 0.0375(n - 5)} \end{cases}$$

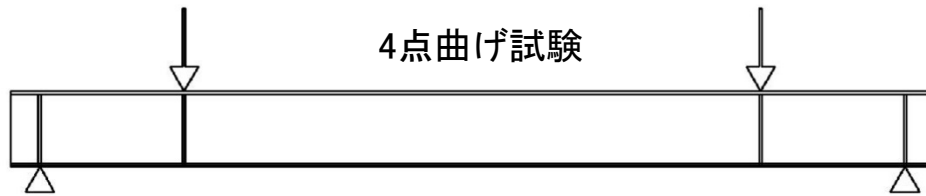
オーステナイト系ステンレス鋼または二相系ステンレス鋼

その他ステンレス鋼

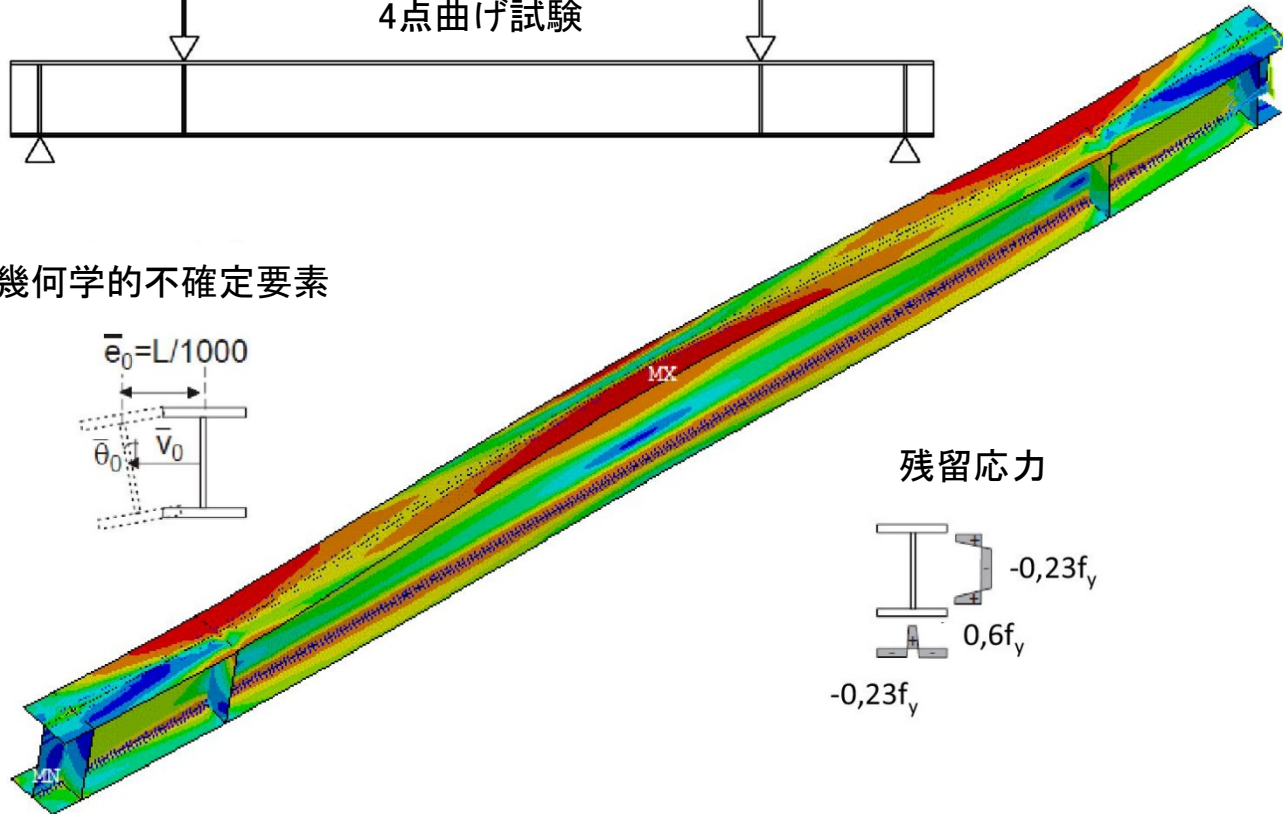
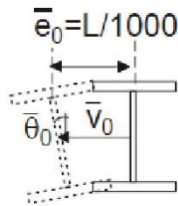
有限要素法

FEM (Finite Element Model)

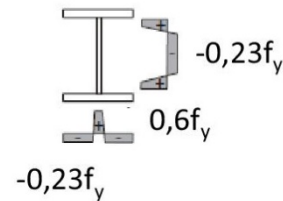
- 平行ねじり座屈荷重を受けるI型ビーム：
全ての影響因子をモデル化することができる



幾何学的不確定要素



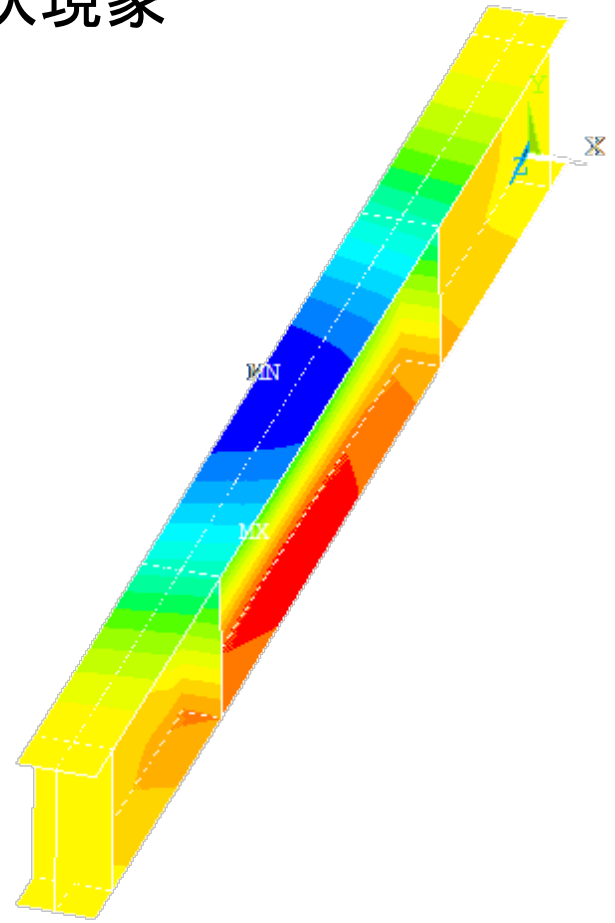
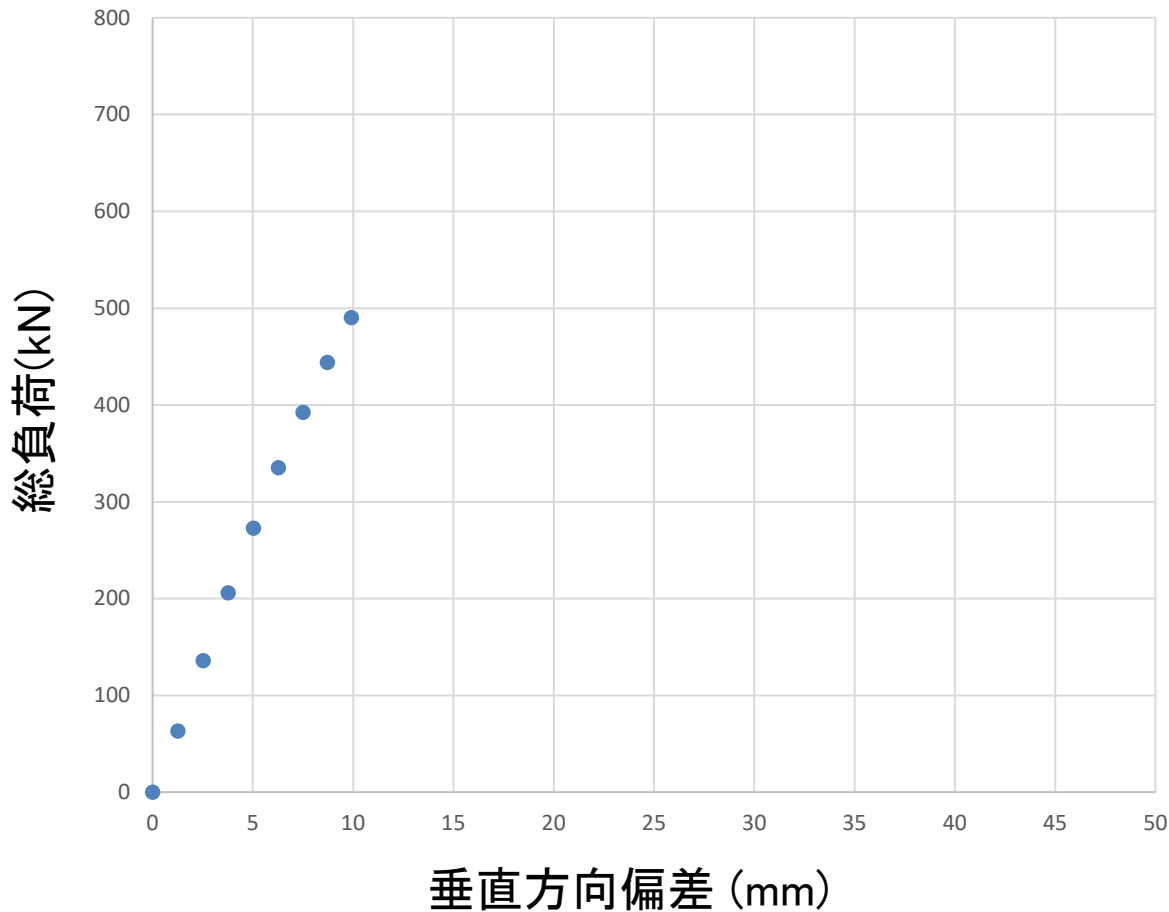
残留応力



有限要素法

FEM (Finite Element Model)

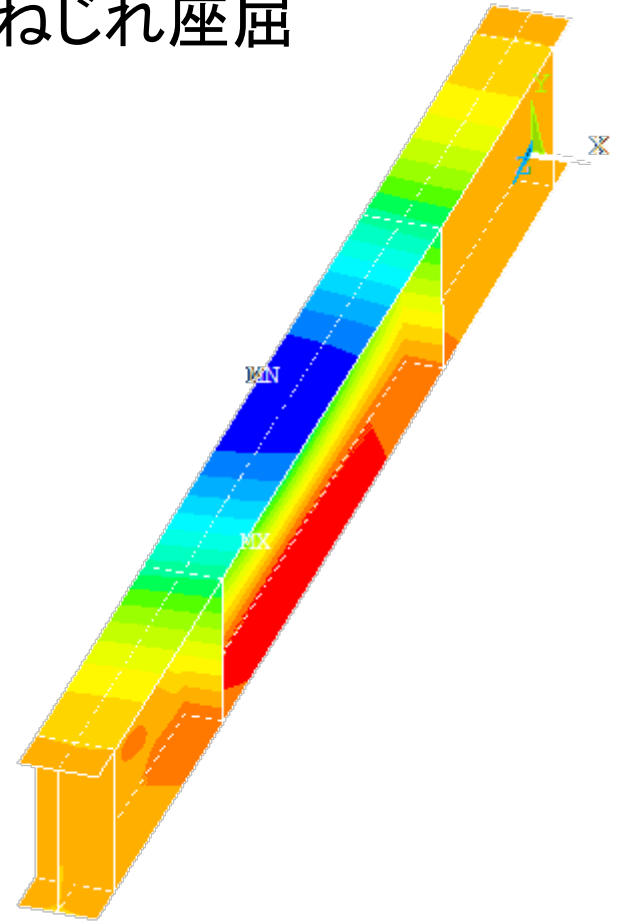
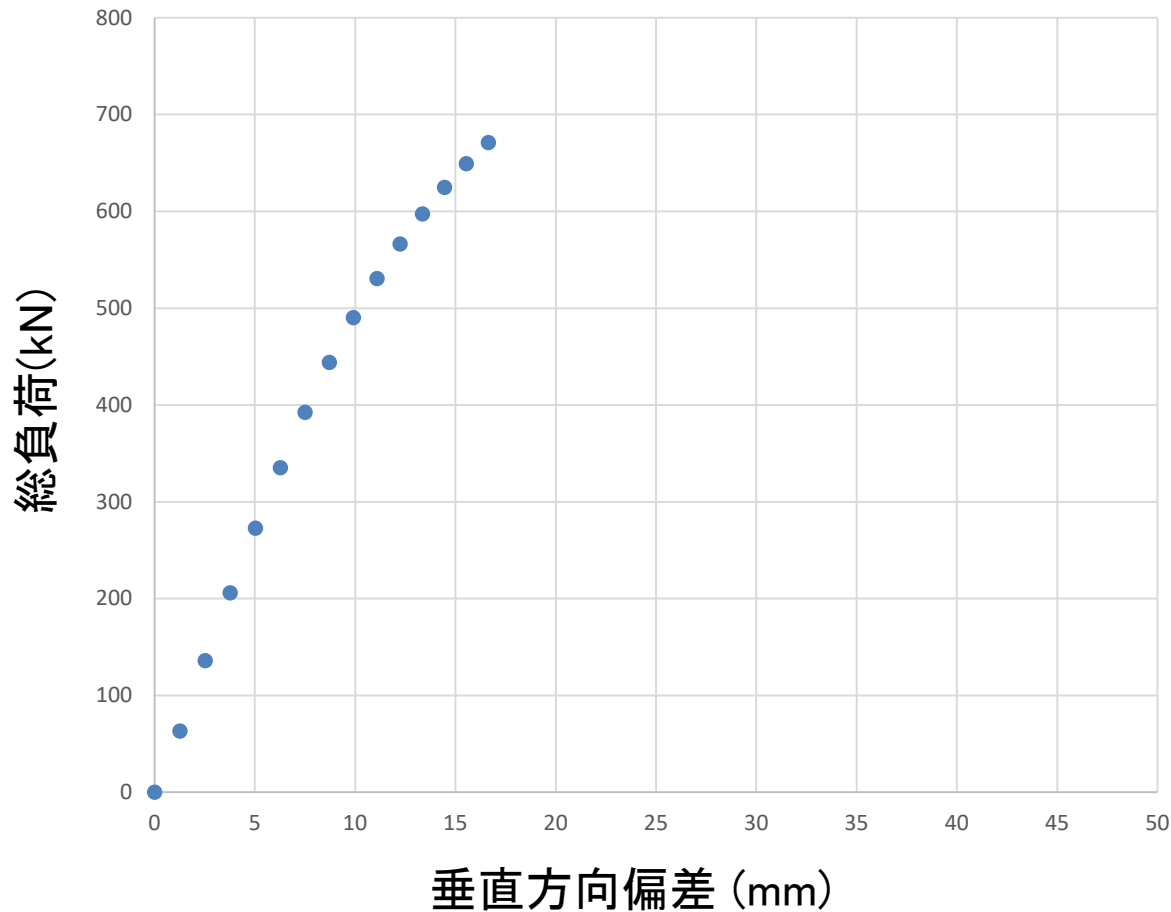
- 負荷-たわみ曲線 : 弾性挙動と初期降伏現象



有限要素法

FEM (Finite Element Model)

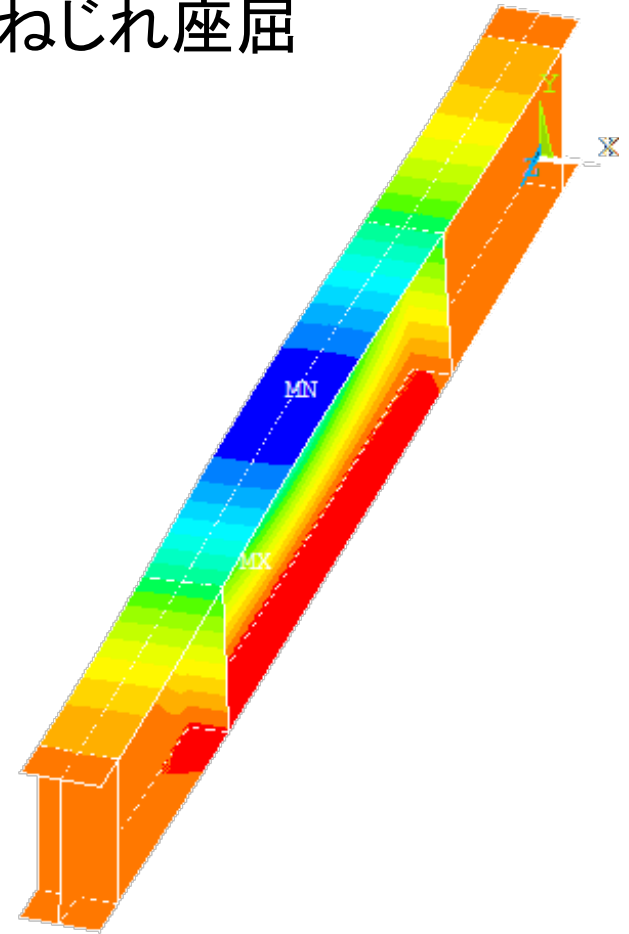
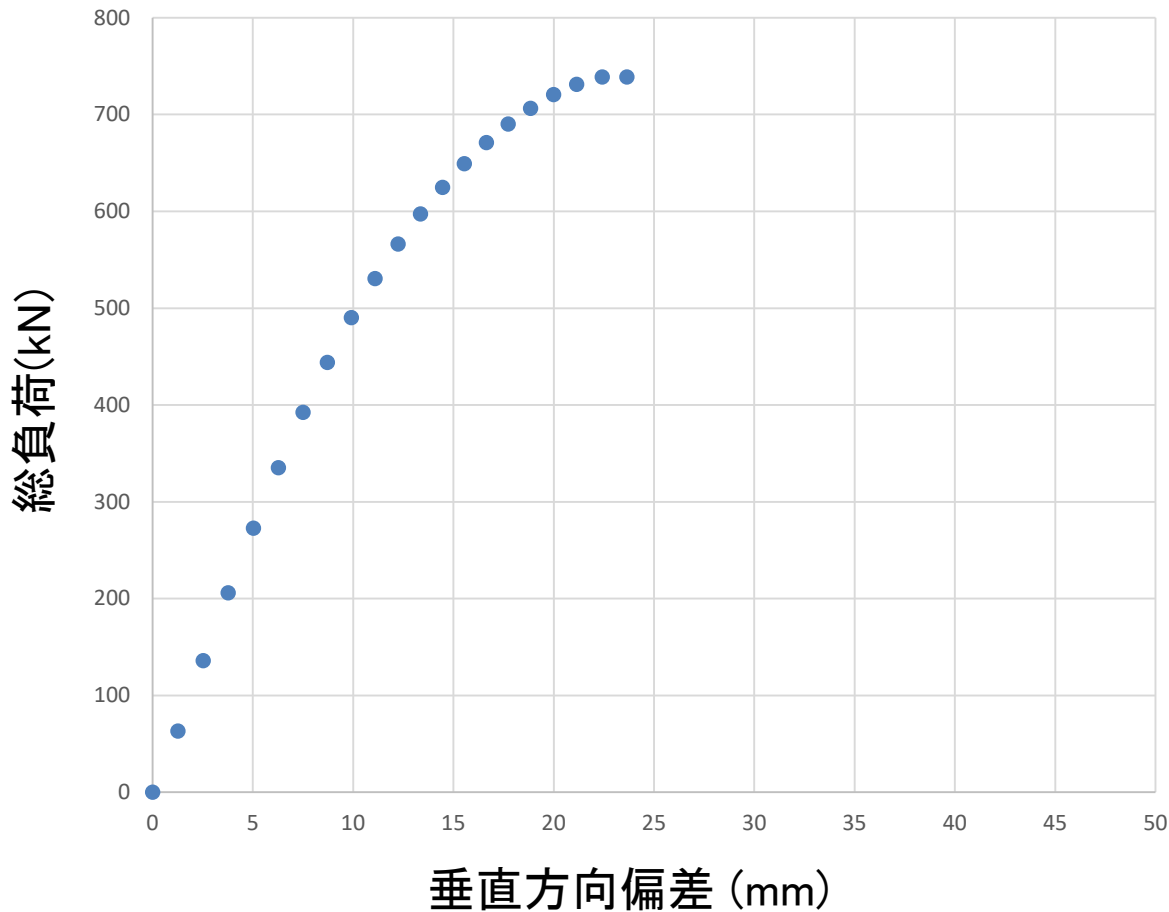
- 負荷-たわみ曲線 : 不安定現象→平行ねじれ座屈



有限要素法

FEM (Finite Element Model)

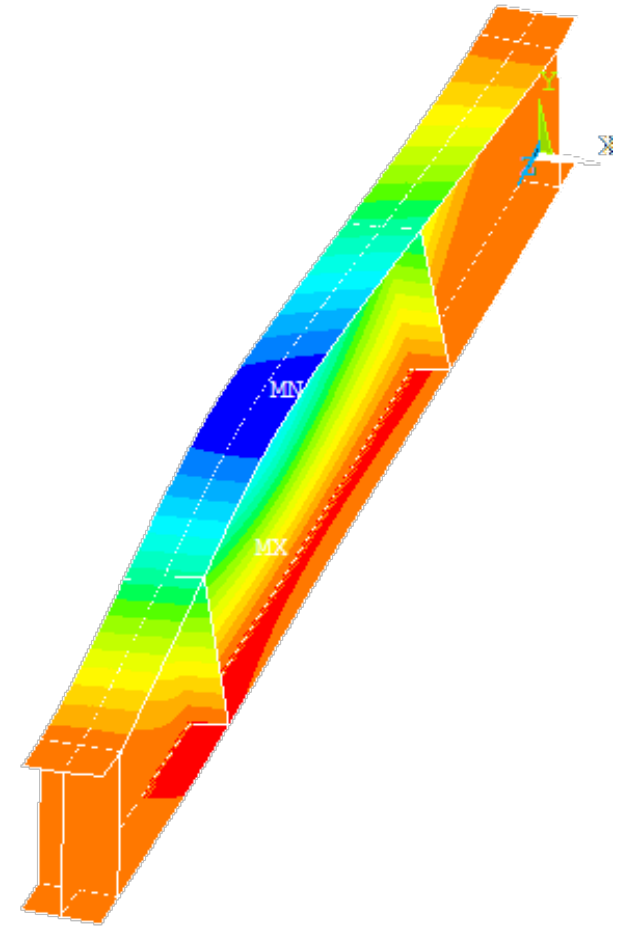
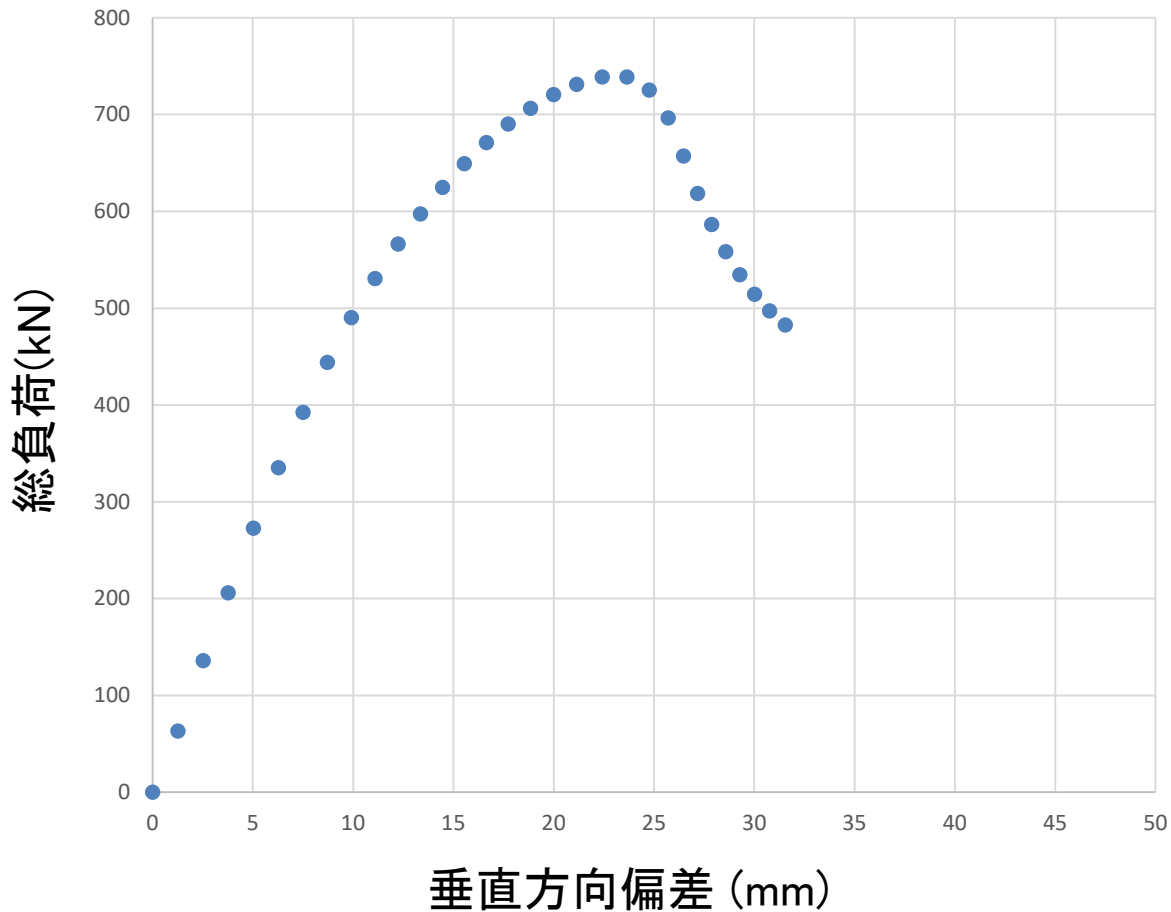
- 負荷-たわみ曲線 : 不安定現象→平行ねじれ座屈



有限要素法

FEM (Finite Element Model)

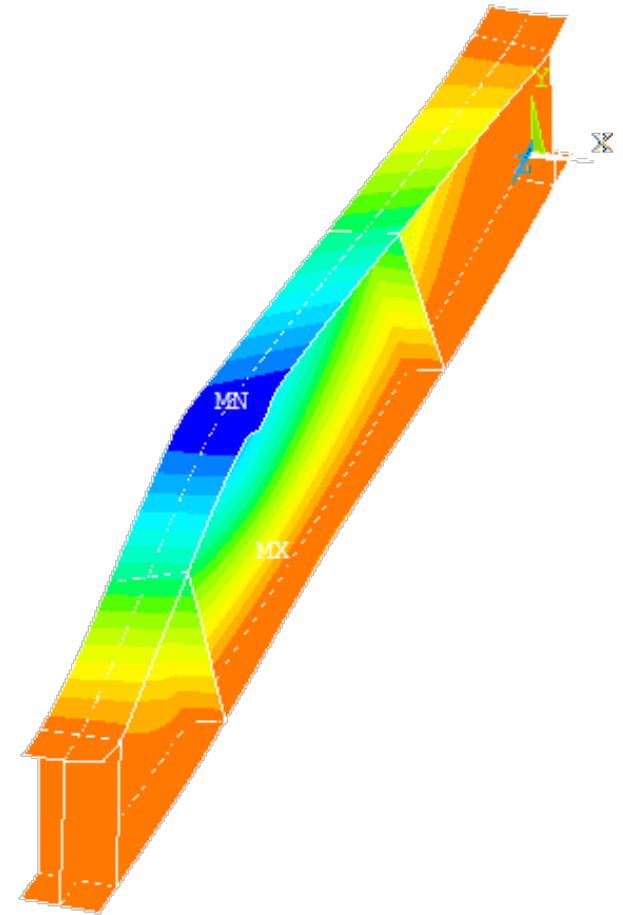
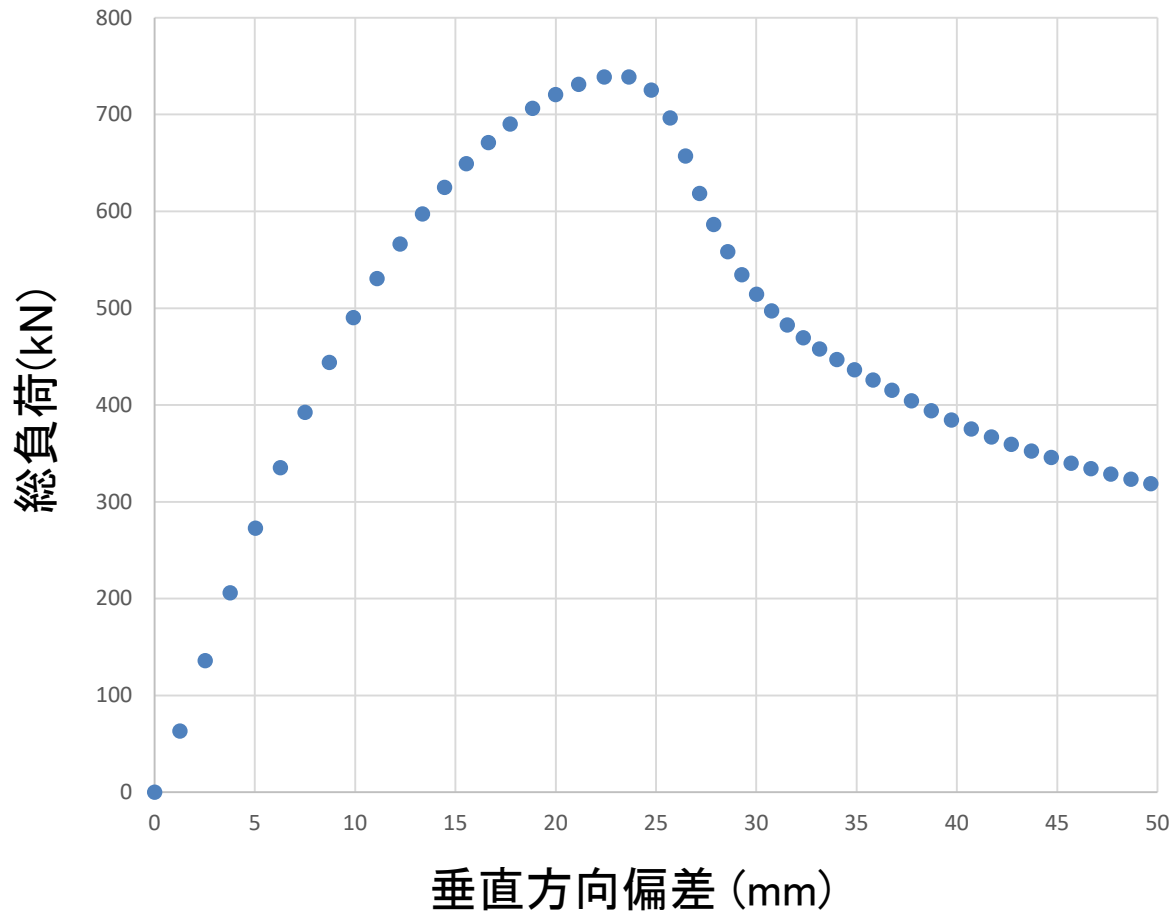
- 負荷-たわみ曲線 : 座屈発生の前兆



有限要素法

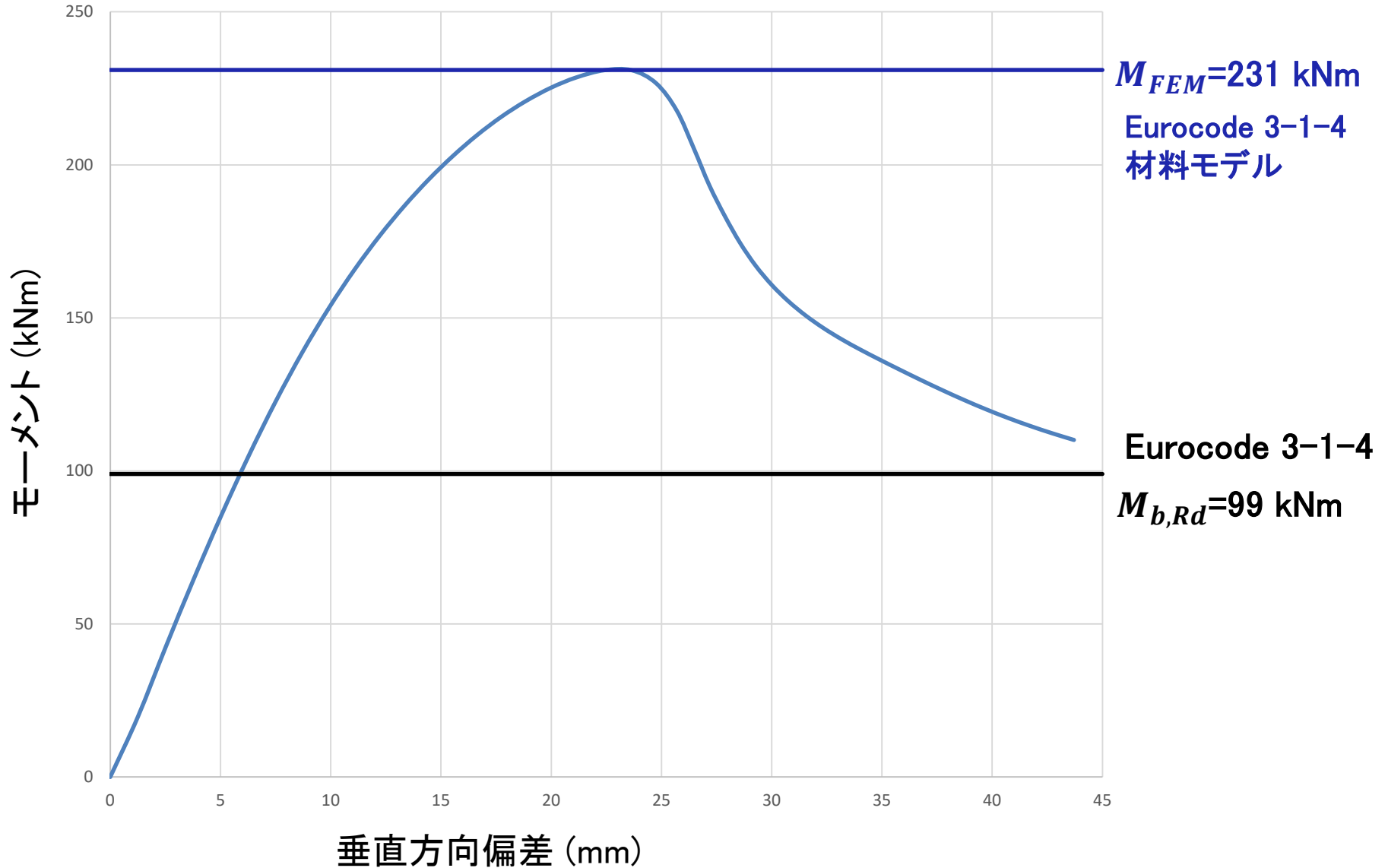
FEM (Finite Element Model)

- 負荷-たわみ曲線 : 座屈発生の前兆



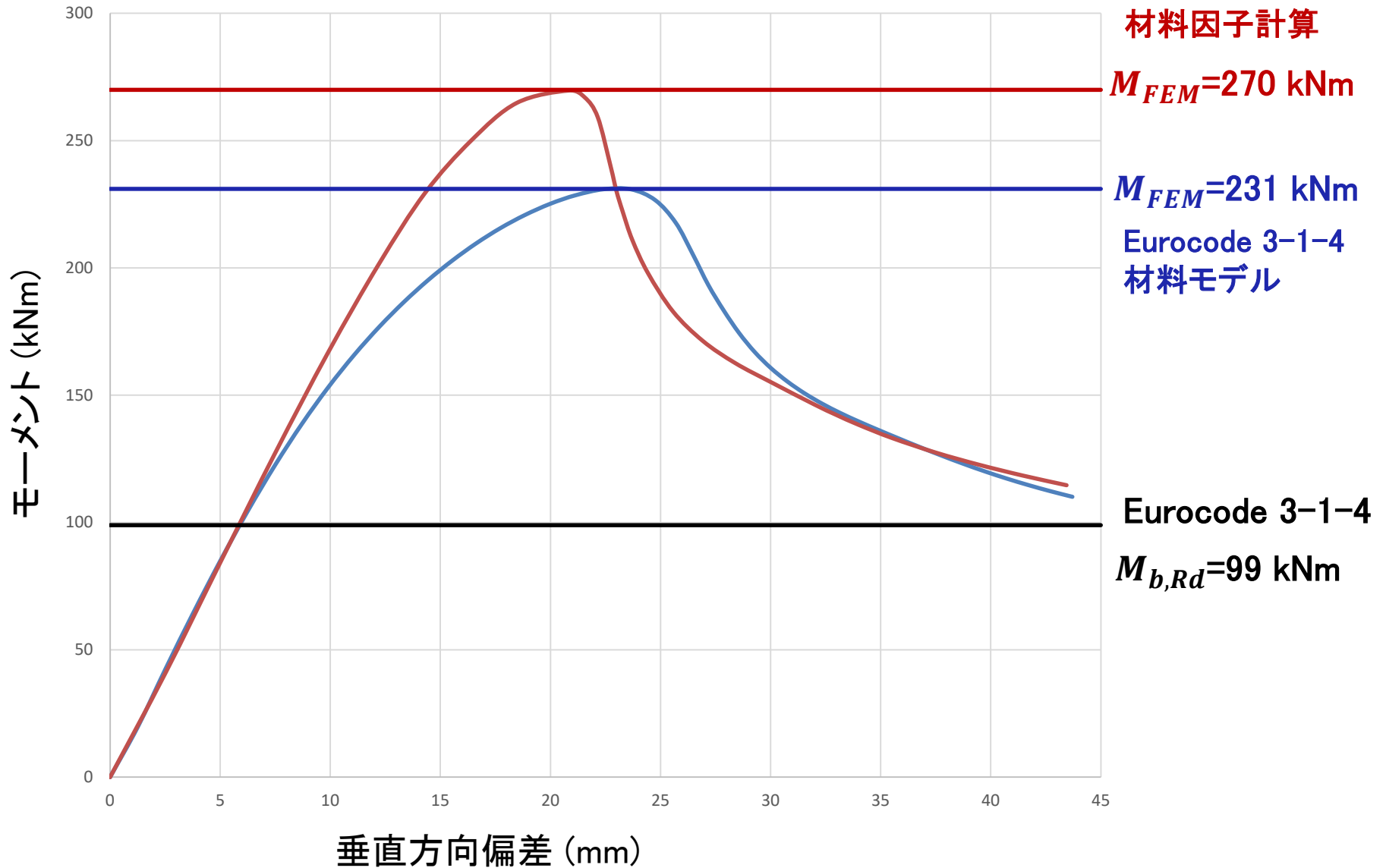
有限要素法

FEM (Finite Element Model)



有限要素法

FEM (Finite Element Model)





Section 5

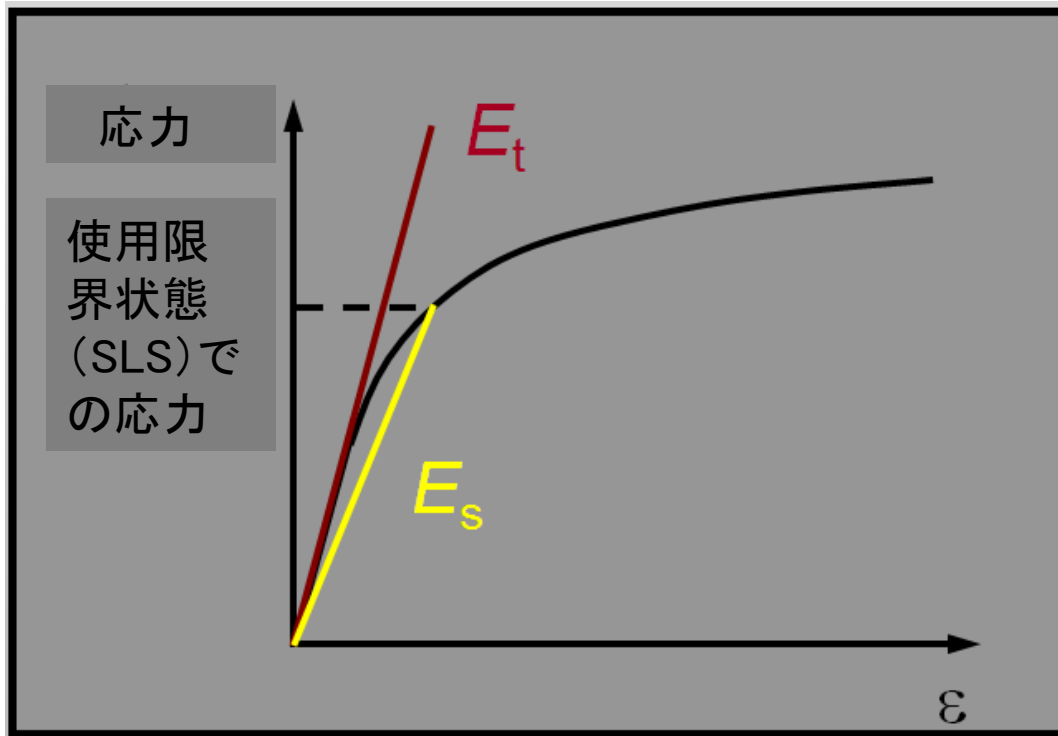
たわみ

たわみ

- 非線形応力ひずみ曲線は、応力が上昇するとステンレス鋼の剛性が低下することを意味する
- たわみはステンレス鋼の方が炭素鋼より若干大きい
- 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関する割線係数 E_s



たわみ

- Ramberg-Osgoodモデルより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におけるたわみ

- Ramberg-Osgoodモデルより算出される
割線係数 E_s

応力率 f/f_y	割線係数 E_s N/mm ²	たわみ増加率 %
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



Section 6

その他追加情報

地震負荷への対応

- 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
- 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

ボルト接合の設計

- 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

ボルト接合の設計

- ざぐり穴に関する炭素鋼ボルトの規定が一般的にはステンレス鋼にも適用できる(張力、せん断応力)
- ステンレス鋼の高い延性を考慮し、変形を限定するために耐荷重に関する特別規定が必要となる

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

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-値に変わる

- 特にステンレス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

溶接接合の設計

- 一般的には炭素鋼の設計規定がステンレス鋼にも適用できる
- 母材のステンレス鋼種に適した電極等を使用する
- ステンレス鋼は炭素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依存する
- オーステナイト鋼と二相鋼の疲労強度は少なくとも炭素鋼と同等である
- 炭素鋼のガイドラインを適用すること



Section 7

技術者向けの情報源

技術者向けの情報源

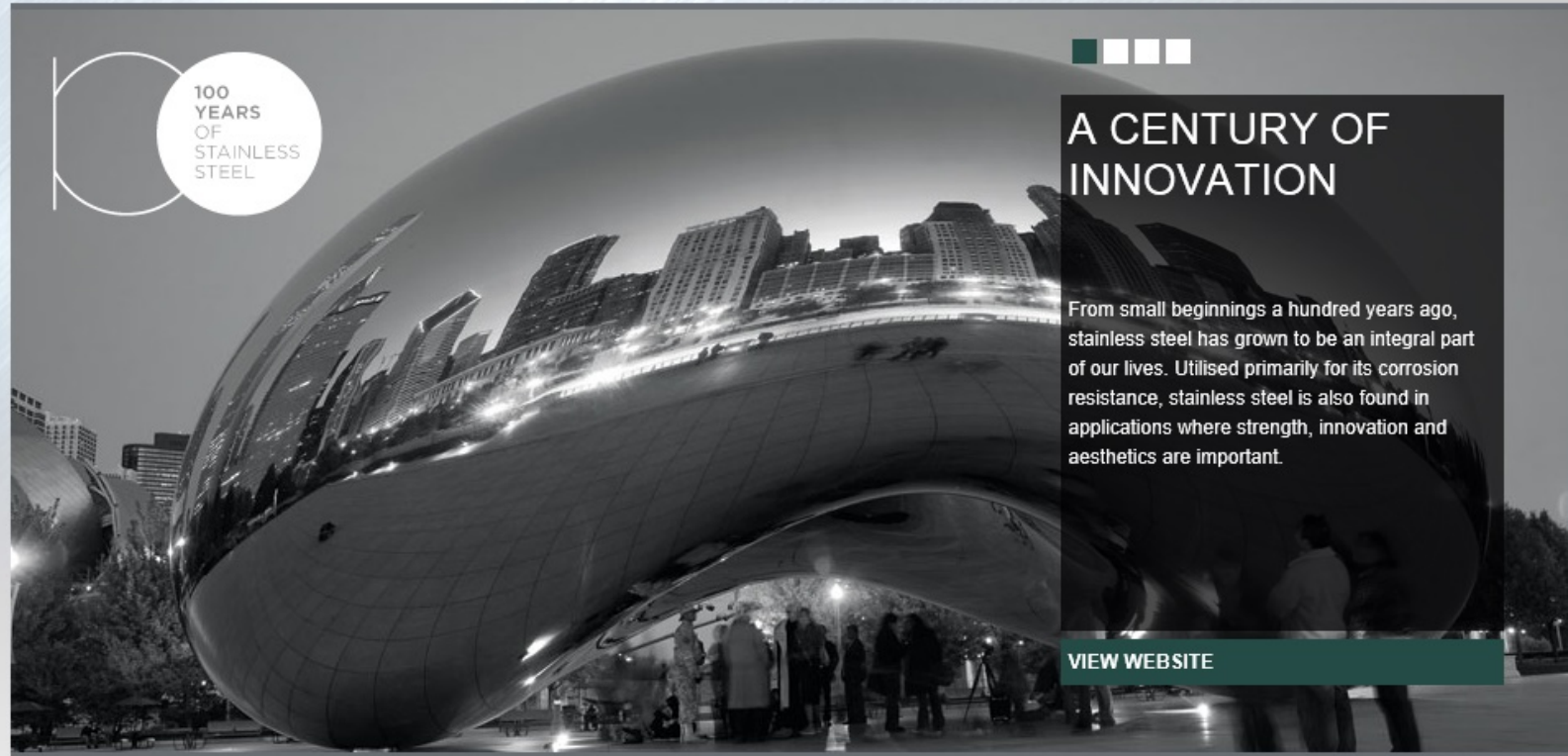
- オンライン情報センター
- ケーススタディ
- 設計ガイド
- 設計例
- ソフトウェア



STAINLESS STEEL P O R T A L

www.steel-stainless.org

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 ステンレス鋼関連ページ

www.stainlessconstruction.com

The screenshot shows the homepage of the website. The header features the title 'ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION' in a light blue box. Below the header is a dark navigation bar with six menu items: SPECIFICATION, CODES & STANDARDS, DESIGN, FABRICATION & INSTALLATION, CASE STUDIES, and RESEARCH. The main content area is split into two columns. The left column contains the text 'Stainless steel at your fingertips...' followed by a paragraph: '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 'Enter search query' and a 'GO' button. The right column features a large image of a circular, arched structure made of stainless steel, likely part of a water treatment facility, set against a clear blue sky.

ケーススタディ 構造12事例

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 (460N/mm²) with good corrosion resistance and tolerance on surface finish.



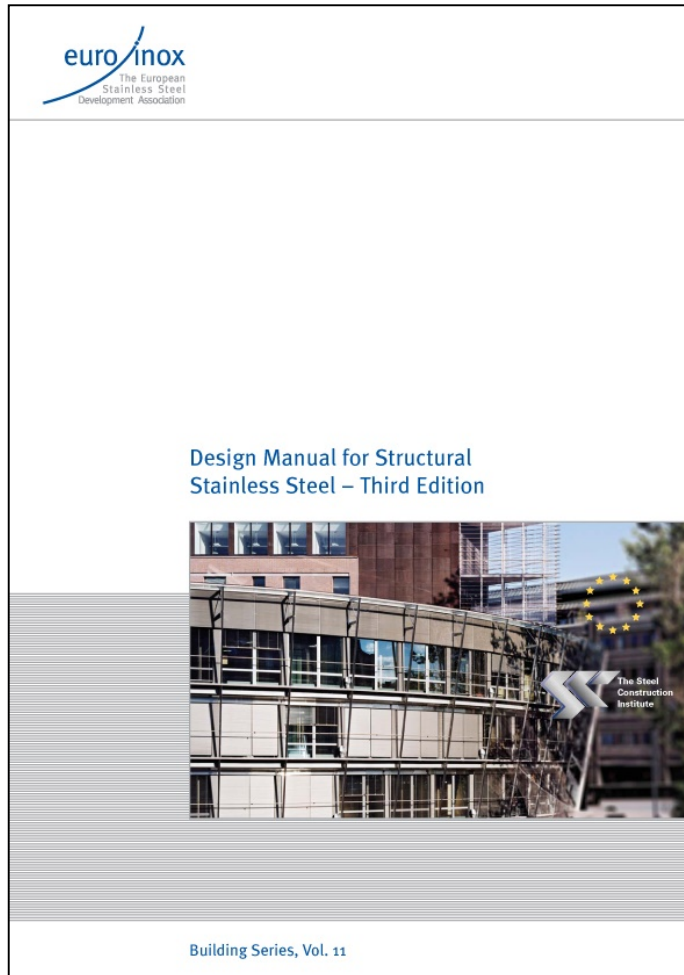
Figure 2: Mono tower and stay cables

A polished 1K finish (as defined in EN 10089 Part 2 [1]) was specified for all exposed surfaces, with an average surface roughness R_a of 0.5 µm. 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.

Structural Stainless Steel Case Study 01 Page 1



設計ガイド Eurocode



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

まとめ

- 構造的耐力

炭素鋼に近似しているが非線形の応力ひずみ曲線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

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



Thank You

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