

ストック型社会実現に向けた建築・土木構造物への ステンレス鋼の適用技術開発

Structural Applications of Stainless Steels in Architecture and Civil Engineering toward the Realization of the Stock-type Society

1. 概 要

日本社会が成熟化する中、良質で長く使えるストック型社会資本の整備が重要視されてきている。人口が増加し生活様式も変化していく中では、その時代に合った“スクラップ&ビルド型”の住宅をいかに安価に多量に供給するかが建築分野での基本的な思想であった。しかし、人口が減少に転じた現在、その住宅供給に対する社会的ニーズも変化しつつある。より“安全、安心”で、多くの手間をかけず長持ちする住宅、長期間にわたって社会的な資産価値が維持される“ストック型”住宅への期待である。

一方、土木分野においても利用者の利便性を追求し、道路や橋などの社会基盤を短期間にいかに充実させていくかに集中してきた。基盤整備が進んだ今、その維持管理、補修あるいは建替工事の負担が急激に増加しており、耐久性が高く、メンテナンスや補修工事の負担が少ない社会資本の整備が強く求められている。さらには、既設の土木構造物に対しても単純な補修工事ではなく、耐久性を改善する補強工事を行うことにより、以降のメンテナンス負担を低減し、構造物全体の寿命延長を図っていく方向に進んでいる。このようなストック型社会資本の整備の流れはライフサイクルコスト(LCC)低減のみならず、環境負荷低減にも大きく貢献することから、今後さらに加速するものと予想される。

本報では、建築・土木構造物へのステンレス鋼の現在の適用状況を紹介し、ステンレス鋼を利用した構造物の高耐久化技術の開発状況およびその可能性について説明する。

2. 建築・土木構造物へのステンレス鋼適用状況

ステンレス鋼のもつ一般的なイメージは“さびない”が“高価な”金属材料で、建築・土木分野においても“メタルカラー”がデザイン上必要な内外装部材などに使用される景観材料の位置づけである。ステンレス鋼の最大の特長である“さびにくい”性質を機能として活かしているのは配水設備部品、建築金物などの二次部材が中心で、構造用鋼材として一般的に認知されているとは言えない。しかし、化学プラント、輸送機器、エネルギー機器分野における溶接構造用高耐食鋼材としての実績を土台に、限定的ではあるが、構造物の高耐久化、メンテナンス負荷低減を目的に下記分野においてステンレス鋼の利用が進んでいる¹⁾。

①河川構造物(ダム、堰、水門などのゲート設備)

常時水に接する腐食環境であり、保守点検やメンテナンスの難しい複雑な構造物であるため、古くからステンレス鋼化(再塗装の困難なゲート本体・導水管類、塗装による耐食性維持の難しいゲート駆動部材・バルブなど)が進んでおり、利用基準も整備されてきた²⁾。

②水道・配水設備

施設の維持管理が容易で、水質に与える影響も小さいことから水道橋を始めとする水道施設への利用は進んでいる。最近では配水池、高架水槽、災害対策用貯水槽へも適用されている³⁾。

③橋梁

国内では未だ実績は少ないが、橋梁構造物への適用も欧州を中心に進んでいる。多くは景観性を重視する人道橋などの小規模橋梁であるが、LCC低減にも有効であることが報告されており、長寿命を求められる大型橋梁にも適用され始めている。現在建設中の香港ストーンカッター橋(世界最大の鋼・コンクリート複合斜張橋)の主塔上部の外殻材および下部工の鉄筋に多量のステンレス鋼が利用されている⁴⁾。

④港湾鋼構造物

栈橋などの鋼構造物で海水による腐食が厳しい干満帯部あるいは飛沫部の防食にステンレス鋼が利用されている。耐海水性ステンレス鋼(NSSC270)を利用した金属ライニング防食は、塗装あるいは電気防食などの従来防食技術よりも長期耐久性、メンテナンス負荷抑制に優れるため重要港湾構造物(例えば、羽田新滑走路工事のジャケット式栈橋)に適用されている⁵⁾。

⑤建築構造物

建築分野においても意匠性を活かしつつ建物の柱・梁構造物などにステンレス鋼を利用したいというニーズから1980年代から構造設計基準の整備が行われてきた⁶⁾。2000年には建築構造用ステンレス鋼がJIS化され、改正建築基準法の告示にも反映され、一般建築構造物にも利用可能となった。意匠性も活かしたアトリウム、キャノピー、プール上屋、外部階段等に利用されている。

このように土木分野を中心に構造物の耐久性向上、メンテナンス負荷低減を目的に徐々にではあるがステンレス鋼の利用が進んでいる。防食処理を施した構造用鋼材を使用するのに比べ初期工事コストは高くなるが、従来の防食技術に全て頼るより、部分的にステンレス鋼を利用した方が供用期間の早い段階でLCCメリットを享受できることが市

場でも認識されつつある。ストック型の社会資本整備に対する意識が強まる中、限定的ではあるがステンレス鋼を上手に利用し、構造物全体のLCCを低減する動きは拡大するものと予想している。

3. ステンレス鋼を利用した構造耐久性の向上

建築・土木構造物が置かれる一般的な自然環境においても海岸近くの飛来塩分量の多い場所ではステンレス鋼も“孔食”が発生しやすくなる。ステンレス鋼を“メタルカラー”の景観材料として使用する場合、あるいは腐食代を考慮できない薄板での利用の場合(前述の海洋構造物の金属ライニング防食、金属屋根)はその環境で発錆しにくい鋼種を選定し、設計、施工、メンテナンス上の配慮も加えられる。構造物のステンレス鋼についても基本は“さびない”あるいは“目立つさび”の発生しないことを基準に鋼種が選定され、利用されているのが現状である。

しかし、構造耐久性を向上させることを主目的にある程度の発錆は許容し、構造性能を維持できる腐食量に抑えるという基準で利用することも考えられる。板厚の大きな構造物でステンレス鋼を“さびない”鋼ではなく、腐食速度の小さい高耐久鋼材として使用する考え方である。このような耐久性設計を可能にするためには、使用条件下での腐食進展挙動を明確にし、構造物としての機能、すなわち強度への影響を正確に把握することが必要である。図1に示すような“孔食”状の腐食形態において構造強度への影響をどのように見積もっていくかポイントとなる。

ステンレス構造建築協会を中心に構造物用ステンレス鋼の長期暴露試験が実施され、データを基に耐久設計指針の確立が図られ、5年間の暴露データから平板部については以

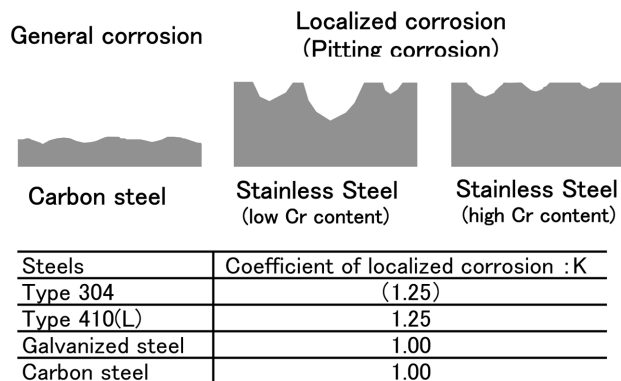


図1 大気暴露後の強度への影響の算定方法(腐食形態の違いを反映した局部腐食係数: Kの値)

Estimation of the effects on the strength of the various type of steels after atmospheric exposure (differences of corrosion behavior are reflected in term of the coefficient of localized corrosion : K)

下の耐久設計基準が提案されている⁷⁾。

$$\Delta t = K(R \cdot t^n) \quad (1)$$

(Δt : 有効肉厚減少率, K: 局部腐食係数, R: 腐食速度係数, n: 腐食速度指数)

本式においてステンレス鋼の腐食速度($R \cdot t^n$)は極めて小さく、また“孔食”状の腐食形態を補正する局部腐食係数も1.25(普通鋼: 1.00)程度と大きくないため、強度に影響する有効板厚減少量も極めて小さいことが明らかになっている。飛来塩分により発錆が避けられない場合でも構造耐久性は維持可能であることがわかる。

ステンレス鋼を構造物材として利用する場合、環境・使用条件に応じてどのような鋼種を選定していくかは構造技術者にとって最も重要な項目であり、日本鋼構造協会の“土木構造物へのステンレス鋼活用拡大委員会”では鋼種選定お

表1 土木構造物の環境分類と推奨可能なステンレス鋼
Classification from environmental factors and recommended steel grades for the structures in civil engineering

Environmental factors			Criterion of grade selection and recommended grades for each division	
Regional division (distance from coastline)	Amount of aerosol chlorides (mdd)	Amount of deposited sea salt (mg/dm ²)	Criteria for preventing from rusting (grade selection of “no rust” steels)	Criteria for keeping structural durability (grade selection of “low corrosion rate” steels)
Severe marine (- 250m)	1.0 -	5 - (on the beach)	Grade A	Grade D - Grade C
		- 5	Grade B - Grade A	
		- 1.0 (eaves/concentrated)	Grade C - Grade A	
Moderate marine (- 2km)	0.1 - 1.0	≒ 0.1 (roof/cleaned by rainwater)	Grade D - Grade C	
Urban or industrial	0.01 - 0.1	< 0.1	Grade D	Grade E
Rural or mountainous	< 0.01		Grade E - Grade D	

Classification of steel grades and typical steels for each grades

Grade A (PI≥38)	NSSC270
Grade B (PI≥32)	SUS329J4L, NSSCDX1
Grade C (PI≥25)	SUS316, NSSC190
Grade D (PI≥18)	SUS304, SUS304N2
Grade E (PI≥11)	SUS430, NSSC410W-M

PI (Pitting Index) = (Cr%) + 3 × (Mo%) + 16 × (N%)

The selection from this criteria requires more careful attention for the localized corrosion such as crevice corrosion.

および利用マニュアルの作成に取組まれた。表1はその提案例で、鋼材の発錆自体を抑えたいケース(外観あるいは機能的な面から発錆しない鋼種を選定する基準)と、ある程度の発錆は許容し腐食速度低減を目的とするケース(構造耐久性を長期維持する基準)にわけて、各種環境区分での鋼種選定の目安を示している。後者の選定基準を採用した場合、合金量の少ないより経済的な鋼種を選定することができ、ステンレス鋼の利用範囲はさらに広がるものと期待される。

4. 建築・土木構造物へのクロム系ステンレス鋼の利用

オーステナイト系ステンレス鋼は耐食性のみならず、厚手の熱間圧延鋼板においても靱性、溶接性が良好なため溶接構造用鋼材として産業用機械、プラント分野において広く利用されている。建築・土木分野においても諸特性のバランス、各種形状での入手性、使用実績から、その代表鋼種：SUS304が今後もステンレス鋼適用検討の中心候補となることは間違いない。高濃度の塩化物を含む厳しい環境を除けばSUS304を適正に使用することにより目立つ発錆は長期間抑制することができ、構造用鋼材としては十分すぎる特性を発揮するが、希少金属であるニッケルを多く含有することから一般構造用鋼、防食を施した構造用鋼材(例えばめっき鋼材)との価格差が大きく、原料コストの変動も受けやすい。LCC重視の方向とは言いながら、初期工事コストの上昇に厳しい国内の現状では普及の障害となっている。

一方、ニッケルを含まないクロム系ステンレス鋼の薄板(冷間圧延鋼板)は自動車・家電分野などで急速に利用拡大してきた。クロム系ステンレス鋼の熱間圧延鋼材は靱性、溶接性の点から構造用鋼材として不向きであると考えられてきたが、不純物低減などの鋼材製造技術あるいは溶接などの利用加工技術の進歩により、11%程度のクロムを含有するクロム系ステンレス鋼の熱間圧延鋼板は構造用として十分な特性を有し、広く適用可能となってきている。以下

に建築構造用の熱間圧延鋼材として開発されたクロム系ステンレス鋼：YUS[®]410W-MSの特性と今後の可能性について簡単に説明する⁸⁾。

本鋼は表2に示すように11%Crをベースに炭素および窒素不純物を極力低減し、製品状態および溶接熱影響部の金属組織が細くなるように調整されている。図2の応力歪曲線に示すように一般構造用鋼材に近い変形特性を示し、構造設計上の基準強度は構造用炭素鋼SS400と同じ値を採用することができる。クロム系ステンレス鋼の課題である溶接部靱性および溶接施工性(耐低温割れ対策)についても著しく改善されている。クロム含有量が少ないため海塩粒子に曝される屋外環境では孔食状の発錆は避けられないが、図3に示すように一般的な屋外環境では腐食進展速度は極めて遅く、長期間の構造耐久性は十分確保される。さらに塗装、めっきなどの従来の防食処理で必要な設計施工上の配慮、加工・溶接部の追加的な防食処理を必要としない。

図4は本鋼を戸建鉄骨住宅の構造部材に適用した例であ

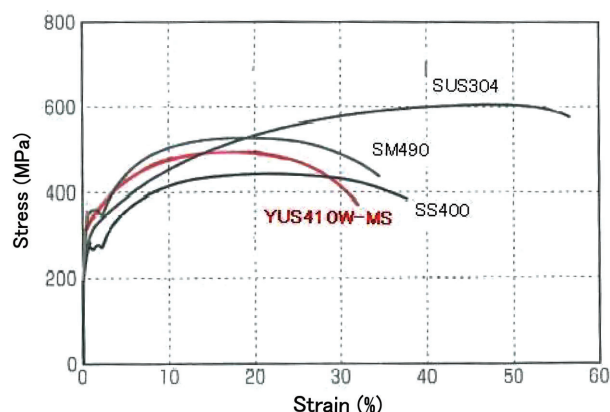


図2 建築構造用クロム系ステンレス鋼YUS410W-MSの応力-歪線
図
Stress strain curves of structural stainless steel for architecture YUS410W-MS

表2 建築構造用クロム系ステンレス鋼YUS410W-MSの化学成分および機械的性質
Chemical compositions and mechanical properties of structural ferritic stainless steel for architecture YUS410W-MS
Chemical compositions

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Specification	≤0.030	≤1.00	≤1.00	≤0.035	≤0.025	10.75-13.50	≤0.60	≤0.025
Typical value	0.019	0.17	0.9	0.022	0.002	11.01	0.41	0.0147

Mechanical properties

	Thickness (mm)	0.2% proof stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Yield ratio (%)	Elongation (%)	Specified design strength (N/mm ²)
Specification	≤5.0	235-390	≥400	≤80	≥21	235
	>5.0				≥18	
Typical value	2.3	286	476	60	33	
	6	283	458	62	37	
	9	262	455	58	42	

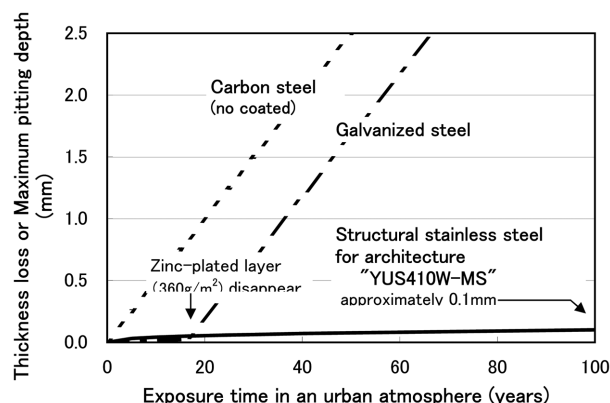


図3 一般屋外環境における各種構造物鋼の耐食性比較（炭素鋼と亜鉛めっき鋼は減肉深さ、ステンレス鋼は最大孔食深さの予測）

Comparison of corrosion resistance in an urban atmosphere for various type of structural steels (thickness loss for carbon steel and galvanized steel, maximum pitting depth for stainless steel)



図4 建築構造物クロム系ステンレス鋼YUS410W-MSの適用例（長寿命住宅の1階構造躯体に使用）

Application of structural stainless steel for architecture YUS410W-MS (structural frames of the ground floor in a long-life house)

る。一般建築物にも適用できるように本鋼は建築基準法37条の大臣認定を受けている。さらに住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)で規定されている“劣化対策等級”の等級3(概ね100年の耐久性)の最高基準を満足する高耐久性構造用鋼材となっている。本鋼は長寿命住宅の構造躯体のみならず、施工あるいはメンテナンス時の防食処理の負荷を低減できる新しいタイプの構造用ステンレス鋼として土木・建築分野での展開が期待されている。

5. クロム系ステンレス鉄筋によるRC構造物の耐久性向上

鉄筋コンクリート構造物(RC構造物)の耐久性向上も求められている。アルカリ度の高いコンクリート中では普通鋼鉄筋も不動態化し通常の状態では腐食しないが、外部からの塩化物浸透、中性化の進行により鉄筋腐食が生じ、コンクリート構造物の劣化要因の一つとなっている。鉄筋腐食は鉄筋自体の強度低下のみならず、さびによる体積膨張がコンクリートのひび割れや崩落を誘発し、RC構造物全体の

耐久性低下をもたらす重大な問題となっている。鉄筋腐食を防止するためにコンクリートの改良、設計施工上の配慮もなされてきたが、鉄筋自体も耐食性の高いものに換える動きがあり、特に厳しい塩害環境にある土木構造物(例えば、海洋構造物、沿岸橋梁、融雪塩対策が施される道路高架橋など)ではエポキシ樹脂塗装鉄筋や、海外ではステンレス鉄筋の適用も進んでいる。

ステンレス鉄筋は鉄筋単体では普通鋼鉄筋よりも高価となるが、構造物全体にステンレス鉄筋を使用する必要はなく、劣化、損傷しやすい箇所(例えば、塩化物の浸透しやすい部位のコンクリート表層に近い鉄筋)に適切かつ限定的に使用することにより構造物全体の耐久性を画期的に向上させることができる。ステンレス鉄筋の限定的な使用により建設コストの上昇も最小限に抑制でき、LCCメリットも大きくなるとともに、RC構造物全体の信頼性向上により資産価値も高めることから、経済的にも十分なメリットを生むものと予想している。

ステンレス鉄筋の使用で先行している欧米(特に英国)では、鉄筋を製造する側からのアプローチのみならず、使用する側からの積極的な取り組みにより、設計、施工に関する技術指針・利用マニュアル類が整備されている。それをベースに海水による塩害が懸念される護岸構造物、沿岸橋梁の下部工など、凍結防止剤による塩害を防止するため寒冷地区の道路構造物、超長期の耐用年数が求められる特殊建築物などで利用が進んでいる。現在工事中の世界最大の斜張橋(香港Stonecutter橋)の主塔橋脚部では約3 000トンものステンレス鉄筋が使用された。欧米での利用状況あるいは国内でのRC構造物の損傷事例からステンレス鉄筋の潜在需要は国内においても数万トン/年あると予想しているが、国内でのステンレス鉄筋の適用実績はごく僅かで、利用する側にもほとんど認知されていなかった。

ステンレス協会およびステンレス構造建築協会ではステンレス鉄筋を利用できる技術環境を整備するために、国の助成を受けながら土木・建築関係の大学関係者、公的研究機関、ゼネラルコンストラクター、ステンレス鉄筋製造メーカーが連携活動してきた。その概要を表3に示すが、これらの活動の結果、2008年3月には“鉄筋コンクリート用ステンレス異形棒鋼”(JIS G 4322)が規格制定され、同年9月には“ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案)”が土木学会から発刊され、国内においてもステンレス鉄筋を利用できる最小限の技術基盤が整った段階である。

この活動の中でステンレス鉄筋の耐食性の高さが再認識され、表4に示すようなコンクリート中での腐食発生限界塩分濃度⁹⁾など、高耐久RC構造物の設計、メリット定量化に反映できるデータが明らかになったことも重要な結果である。国内においては高耐久性鉄筋としてエポキシ樹脂被覆鉄筋の利用が先行しているが、鉄筋加工・切断後の再塗

表3 ステンレス鉄筋の利用技術開発および技術基準
Development of application technology and design standard of stainless steel bars for reinforced concrete in Japan

	Civil engineering	Architecture
Name	Recommendations for design and construction of concrete structures using stainless steel bars -draft-	Development of high durable reinforced concrete structures for architecture using stainless steel bars
Organization	Japan Society of Civil Engineering	Stainless Steel Building Association of Japan
Date	Published at September, 4 in 2008	2005 - 2007 fiscal years
Type of bars	Type 304, 316, 410 (L)	Type 304, 410 (L)
Outline	On the basis of the experimental data of stainless steel rebars, recommendation for design and construction of concrete structures was published.	The fundamental research required for architectural application had been conducted with subsidy of MLIT Japan.

表4 各種鉄筋の腐食発生限界塩分濃度と許容ひび割れ幅の推奨値
Critical chloride concentration of rust appearance in concrete and allowed concrete crack width, which are recommended in civil engineering

Bars	Critical chloride concentration of rust appearance in concrete (kg/m ³)	Allowed concrete crack width (mm)
Carbon steel bars	1.2	0.005c ^{*1} (general)
Epoxy coated bars	(2.0-7.6★)	0.0035c (severe)
Stainless steel bars	Type 410	9.0
	Type 304	15.0
	Type 316	24.0

★Estimated from the research of the damage in actual structures *1 c: concrete cover thickness

装処理、塗膜保護のための工事現場での施工制限・配慮、現場施工時の塗膜品質管理の難しさから生じる信頼性への不安感などの課題がある。一方、ステンレス鉄筋は鉄筋自体の耐久性が高く、普通鋼鉄筋と同様な取扱いが可能であるため、高耐久性鉄筋として今後普及していくものと予想している。

現在、SUS410(12%Cr)、SUS304(18%Cr-8%Ni)、SUS316(17%Cr-8%Ni-2.5%Mo)の3種類がJIS規格化されており、鉄筋の素材コストと耐久性のイメージは図5に示すとおりである。コンクリート中での耐久性評価試験結果より、Niを含まないクロム系ステンレス鋼：SUS410の鉄筋で広く適用可能であることから、SUS410の鉄筋(新日鐵住金ステンレス 商品名：NSSD®410)を普及性の高い高耐久性鉄筋として位置づけ、積極的に適用展開している。現在までのNSSD410鉄筋の適用事例を図6に示す。今後は塩害環境下で高耐久化が求められる港湾設備、沿岸橋梁、融雪塩を使用する道路構造物、トンネルなどの土木構造物で本格的な適用が進むものと予想している。

建築分野においても超長期の耐久性を求められる神社仏閣などの特殊建築物(図7(a))、沿岸建築物の外周部や基礎などから適用は進むものと予想している。さらには国土交通省を中心に2008年度から始まった超長期住宅(いわゆる

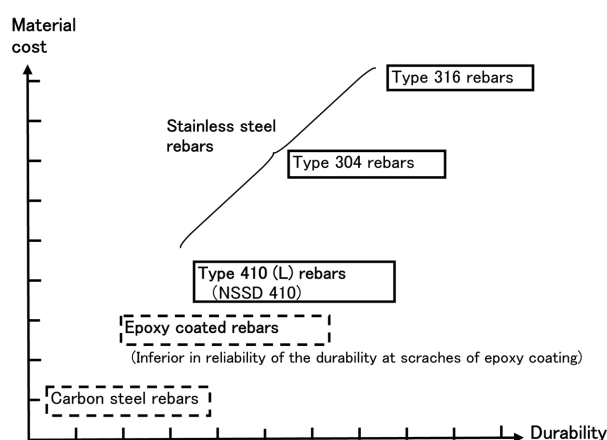


図5 ステンレス鉄筋のコンセプト (素材コストと耐久性)
Concept of the stainless steel reinforcing bars (durability and material cost)

200年住宅)モデル事業においてNSSD410鉄筋を用いた高耐久住宅の着工が予定されている(図7(b))。高耐久RC造の超長期住宅の実現により200年間でLCCを35%低減、CO₂排出量も45%低減できることが期待されている。なお、一般建築物での適用を進めるために新日鐵住金ステンレスのSUS410鉄筋は建築基準法37条第2号の国土交通大臣認定を取得している(ステンレス鉄筋はJIS化されたが、一般建築用として使用する場合は事業者毎に同法で規定された大臣認定が必要である)。

今後、厳しい塩害環境にある特殊構造物のみならず、“ストック型”社会資本の整備に向けて、一般RC構造物でもステンレス鉄筋の利用が拡大していくことも考えられる。ステンレス鉄筋は試用から普及の段階に入りつつある¹⁰⁾。

6. 今後の展開

良質で長く使えるストック型社会資本の整備が求められる中、建築・土木分野におけるステンレス鋼の利用状況ならびに構造物として活用拡大の可能性について説明し、構造物クロム系ステンレス鋼およびクロム系ステンレス鉄筋の普及の取組みについて紹介した。今後、ステンレス鋼を構造物にさらに利用拡大していくためには、どの部位に、



図6 クロム系ステンレス鉄筋NSSD410の適用事例
Applications of Ferritic stainless steel reinforcing bars NSSD410

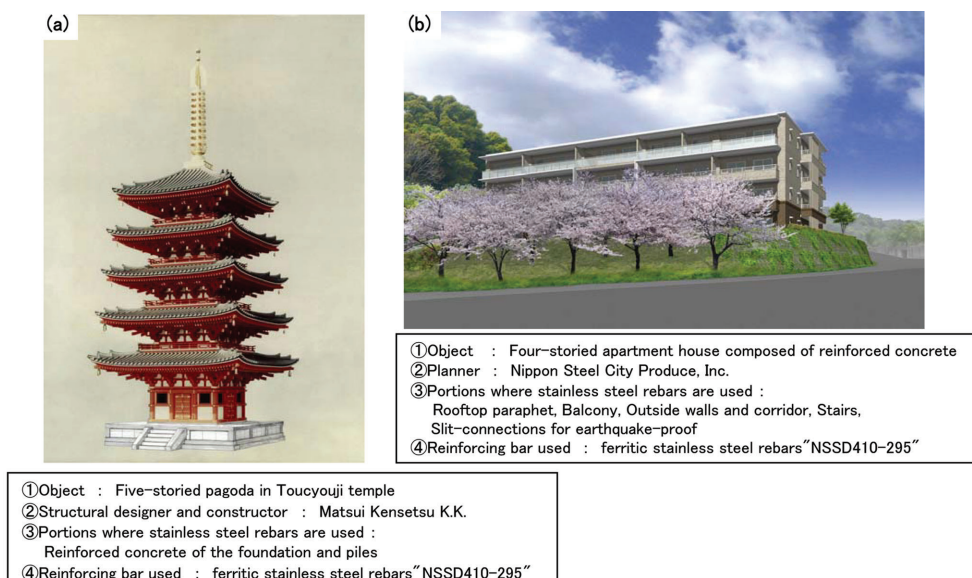


図7 クロム系ステンレス鉄筋NSSD410の今後の展開
Application in planning of using ferritic stainless steel reinforcing bars NSSD410

どのステンレス鋼を、どのように利用すればどのようなメリットが得られるのかを個々の構造物で具体的に示し、一般的な設計が可能となるように基準化していくことが重要である。

ステンレス鋼のみならず他の材料を使用する場合も同じであるが、ステンレス鋼は鋼種によって耐食性能、強度特性が大きく異なり、使用環境・条件によって耐食性能が左右されるためその重要性は高い。適切な鋼種選定および利

用方法であれば構造物全体の耐久性向上、LCC低減に大きな効果を発揮するが、鋼種設定あるいは利用方法が不適切であればメリットは得られず、予期せぬ不具合を招くこともある。計画、設計、施工、維持管理に携わる技術者にもステンレス鋼の優れた点、留意すべき点を十分認識して頂き、ステンレス鋼の特長を最大限活用できるような利用技術が益々重要となってくる。ステンレス鋼を製造するメーカーの材料技術者と利用する側の建築・土木分野の構造技

術者がより密接な連携を図り、ストック型社会実現に向けて建築・土木分野でのステンレス鋼の利用技術開発がさらに進むことを期待したい。

参照文献

- 1) 日本鋼構造協会：ステンレス鋼の土木構造物への活用検討小委員会 技術資料
- 2) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)マニュアル 編
- 3) 日本水道鋼管協会：WSP068-2004、水道用ステンレス鋼管設

計・施工指針。(2004年2月)

- 4) 山根 薫：ステンレス建築. No.37, (2009-2)
- 5) 日本鋼構造協会：鋼構造シンポジウム2008 講演会資料
- 6) ステンレス構造建築協会：ステンレス建築構造設計基準・同解説. 第2版
- 7) 武藤 泉：ステンレス建築. No.27, (2005-8)
- 8) 天藤雅之：ステンレス建築. No.28, (2006-2)
- 9) 土木学会：ステンレス鉄筋を用いるコンクリート構造物の設計施工指針(案). 2008-9-4
- 10) 天藤雅之：コンクリートテクノ. 27(11), (2008)

お問い合わせ先
新日鐵住金ステンレス(株) 商品開発部
TEL(03)3276-4890