

耐震設計のコンセプト —建築鉄骨造 耐震設計の考え方と鋼材について—

株式会社竹中工務店 東京本店技術部
護 雅 典

1. 建築鉄骨に使用される鋼材について

現在、建築構造は超高層化、大スパン化といった規模の拡大、あるいは柱・梁からなるラーメン構造以外の構造形式も多くなるなど構造要求性能は多様化している。このような構造要求性能の多様化に対応して、高強度鋼、極厚鋼、低降伏点鋼など新しい鋼材も数多く開発され、実用に供されている。

しかし、建築全体で見た場合には、5階以下の低層建物が全体の9割程度を占めるといわれている。このような現状を考え、数多くある鋼材の中でごく一般的に使われている引張強さ 400N/mm²、490N/mm² 級鋼材の内、SN材についてその特徴などを述べる。

鋼材には鋼板、鋼帯、形鋼があるが、ここでは鋼板を念頭に記述する。

2. 建築鉄骨鋼材の現状

建築構造物は、建築基準法により設計法や、使用できる材料(この場合は鋼材)が規定されている。具体的には、建築基準法 37 条の「指定建築材料」に SS、SM、SN 材が規定されている。この中で低層建築鉄骨用として実績が多いのは JIS G 3101 の SS400、JIS G 3106 の SM490A である。即ち強度が 400N/mm² クラス鋼材の代名詞は SS400、490N/mm² クラス鋼材の代名詞は SM490A といっても過言ではない。そして、JIS G 3136 の SN 材がある。表 1 に、名称・用途などを示す。

表 1 鋼板の JIS 規格

規格	規格名称と略号	用途
JIS G 3101	一般構造用圧延鋼材 (SS)	橋、船舶、車両ほか
JIS G 3106	溶接構造用圧延鋼材 (SM)	橋、船舶、車両、石油貯槽、容器ほか
JIS G 3136	建築構造用圧延鋼材 (SN)	建築構造物

3. JIS G 3136 が制定されたのは何故??^{1)~3)}

このような現状ではあるが、表 1 のように「建築構造用」と銘打った鋼材規格 JIS G 3136 の SN 材は何故、制定されたのであろうか?

本来、鋼材の選定にあたっては、選択した鋼材規格、例えば SS 材には何が規定されているのかを十分吟味し、もし性能が不足していると考えるのであればその不足している性能を別途要求する必要がある。例としてあげた SS 材の規格では溶接性に関する規定がないので、もし溶接性を求めるのであればその要求が必要ということである。

建築鉄骨の必要性能といった面からこれまで多用されてきた鋼材規格をみたとき、必要性能が規格に盛り込まれていたのか、といった反省から SN 材規格化がスタートしている。

3.1 耐震設計方法

日本は世界有数の地震国である。大きな地震を経験するたびに設計法などが変わってきた。昭和56年（1981年）6月には耐震設計に新しい考え方を採用したいわゆる新耐震設計法が制定・施行された。建築鉄骨では地震に対して「強さで抵抗する」という考え方の他に、「建物が変形する際のエネルギー吸収能力に期待する」という設計の考え方も採用している。建築鉄骨以外の業界の方には、「変形を許容する」という考え方に違和感があるかもしれないが、大地震時にはある程度変形することを許容することにより建物の倒壊を防止し、経済的にもバランスのとれた構造設計が可能となる。最近では、構造体に大きな変形性能は要求しないで（弾性範囲に収まるように設計）、ダンパーなどを利用する構造形式も多くなっているためダンパー用鋼材についても簡単に触れる。

鉄骨造建築物であれば、建物に入る地震エネルギーを鋼材の塑性変形を利用して鉄骨骨組みに吸収させ建物が倒壊しないようにするというものである。特に梁は塑性変形して柱は弾性域であるのが望ましい。

この設計方法に対応した鋼材に必要とされる性能は、鋼材の降伏後の伸び性が大きく降伏点のばらつきが小さいこと、溶接性やじん性の確保などであるが、この時点ではこれらの必要性能に対応した鋼材規格の制定や既存規格の改定は行われなかった。

3.2 不良鉄骨問題

SN材の規格化を後押しした要因の一つは1991年、1992年にかけて発生した不良鉄骨問題である。一般新聞誌で報道されたが、そのきっかけとなったのが鋼材の2枚割れ（開裂）であった。溶接用鋼材としてのJIS規格品を通しダイアフラムに使用して、普通に行われている溶接方法で溶接したが、翌日には通しダイアフラムの板厚中央に割れが入ったというものである。この報道をきっかけにし、建築鉄骨に関わる各種問題点を解決すべく各種施策が実行されたが、その一つが建築鉄骨に必要な鋼材規格の制定である。



図1 不良鉄骨問題報道（下線：筆者）

3.3 SN材の規格制定

前述の開裂に対しては、日本建築学会でも大きく取り上げられ、原因の追究が行われた。特定メーカーの特定鋼材で発生した現象であったが、その鋼材の製造根拠とした JIS 規格の規定内容が、建築鉄骨の要求内容と合致していないことがわかった。ただ、この要求内容は明示的に記されておらず、暗黙の約束事であった。(利用者は、JIS で作られて鋼材だから、いくら規格に規定が無いといっても、開裂などしないとある意味勝手に思っていた)。

工業製品の JIS 規格制定はどちらかというと製造側からの要求が多いが、SN 材については日本建築学会など建築業界（主に使用者側）から、地震国である日本の建築鉄骨に適した鋼材の JIS 化要望が出された（暗黙の約束事を明確にする）、というところに特徴がある。

この時の制定主旨は、

- ① 3.1 に示した新耐震設計法に使用する鋼材の信頼性の向上
 - ② 溶接接合に優れた鋼材が容易に入手できる
 - ③ 鋼材の使用部位を考慮した材料選定を促す
- であった。

3.4 規格化にあたっての具体的要求事項と対応する規格の内容

規格化にあたっての具体的要求事項は

- ・塑性変形能力の保持
- ・溶接性の確保
- ・厚さ方向性能の確保
- ・公称断面寸法の確保
- ・使用部位を考慮した適切な鋼材種選択 である。

これに対する規格の内容を下に示す。

(1) 強度レベルの設定

建築鉄骨はすそ野が非常に広い、また、その多くが中低層建物であるので、これらを主な対象と考え、強度レベルは 400N/mm^2 、 490N/mm^2 とした。

(2) 塑性変形能力の確保

図 2 に示す降伏比の上限規定による降伏後の伸び性能確保のイメージを示す。図 2 は鋼材の応力-ひずみ曲線で、ここで降伏比は次式で定義される。

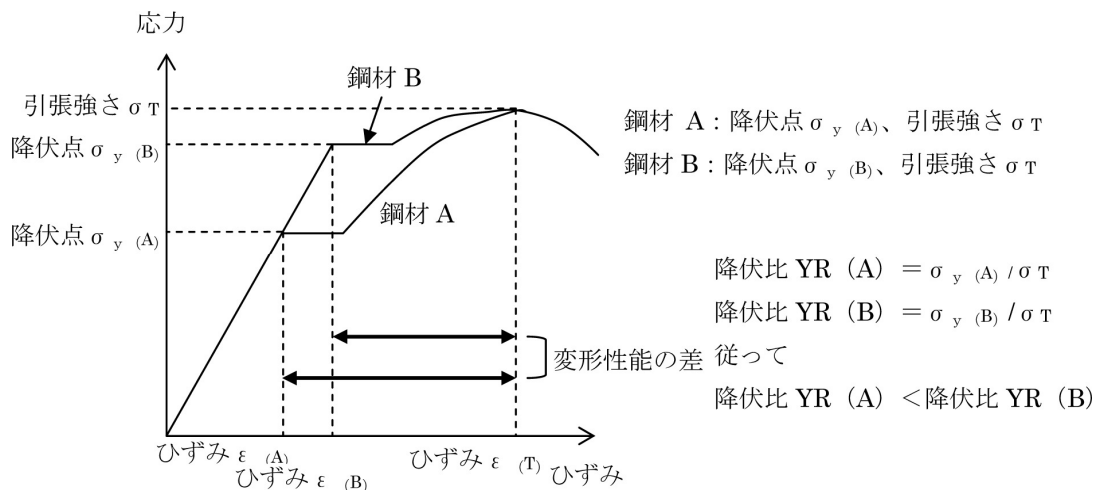


図 2 降伏比と変形性能

ここで、図中に示したように

降伏比 (YR) = (降伏点/引張強さ) × 100 (%) である。同じ引張強さで降伏点の値が異なる鋼材 A、B を考えたとき、降伏点は鋼材 B の方が大きいので、降伏比は A に比べ高くなる。

これをひずみの軸でみると、降伏点に達してからひずみ $\epsilon_{(T)}$ までどれだけ変形できるか (変形性能) とみることができる。鋼材 A と B を比べると降伏比が低い A ほどひずみ $\epsilon_{(T)}$ までの変形性能が高いといえる。従って、塑性変形能力を要求する部材に使用する鋼材には「降伏比が低いこと」が要求される。

(3) 降伏点の上下限値の規定

構造計算は降伏点の下限値で行われる。そして降伏点以降の変形性能を期待しているので、実際に使用している部位によって同じ規格の材料であっても降伏点の下限値が変わってしまうと、構造計算上の仮定と大きくかけ離れる可能性がある。そこで実際に使用する鋼材によって大きく変わらないように、降伏比の上限規定の他に降伏点の上限値が規定され降伏点は上下限値が規定された。

なお、80%と規定されている降伏比について使用者側はさらに低い要求を出したようであるが、今のところ規格の改正はされていない。そのため設計者 (案件) によっては更に低い値を追加要求される場合もある。

(4) 溶接性の確保

炭素当量 (Ceq) あるいは溶接割れ感受性組成 (PCM) の上限を規定した。これまで SM 材は「溶接用」とは言いながら Ceq の規定はなかったが、溶接性を担保する意味で規定された (後述するが、規格内容と鋼材の持つ実力は別である。SM 材が溶接に向かないという意味ではない)。

(5) 厚さ方向性能の確保

板厚方向 (Z 方向) 引張試験での絞り値の下限を規定した。建築鉄骨は十字継手および T 継手が多いため、板厚方向に力がかかることもある。そのような使用をする場合 (3.2 で述べた開裂部分も T 継手であった) を考慮して規定された。

(6) 公称断面寸法の確保

板厚のマイナス側の許容差を小さくした。鋼板および鋼帯のマイナス側の許容差は板厚に関わらず一律 0.3mm とした。

(7) 使用部位を考慮した適切な鋼材種選択

鋼材種に A,B,C 種を設けた。用途と使用想定部位を表 2 および図 3-1~図 3-2 に示す 4)。

A 種 : 二次部材 (小梁、間柱等) など弾性範囲で使用し、変形性能や高い溶接性が必要とされない非耐震部材に適用。溶接性の規定はない。また降伏点の上限や降伏比の規定はない。

B 種 : 塑性変形性能や溶接性能が要求される部材 (柱や大梁) に適用。溶接性、降伏点の上限、降伏比の上限が規定されている。

C 種 : B 種に加え厚さ方向の絞り値や板厚内部欠陥検査が要求される部材 (通しダイアフラムや溶接組立箱形断面柱のスキンプレート等) に適用。B 種の項目に加え、Z 方向絞り値の下限、UT 検査が規定されている。

また、B,C 種にはシャルピー吸収エネルギー vE_0 の下限が 27J と規定されている。

但し、これらをどの部位に使用するかは JIS には記載されていない。上記特性を考慮して設計者が鋼材種を選定し、図面に特記することになる。なお、400N/mm² 級には 400A,B,C 種があるが、490N/mm² 級は B,C 種のみである。その理由は、小梁、間柱等で 490N/mm² 級を使用することはごく少ないと考え、A 種は設定されていない。さらに表 3 に SN 材の主な規定内容を SS 材および SM 材と比較して示す。

表 2 SN 材の主な用途と使用部位例

記号	主な用途	使用部位例
SN400A	塑性変形が生じない部材または部位。溶接を行う構造耐力上主要な部材への使用は想定しない。	小梁、間柱、二次部材等
SN400B SN490B	C 種以外の、一般の構造部材または部位。	大梁、柱
SN400C SN490C	溶接組立加工時を含め、板厚方向に大きな引張力を受ける部材または部位。	柱、通しダイアフラム、ベースプレート

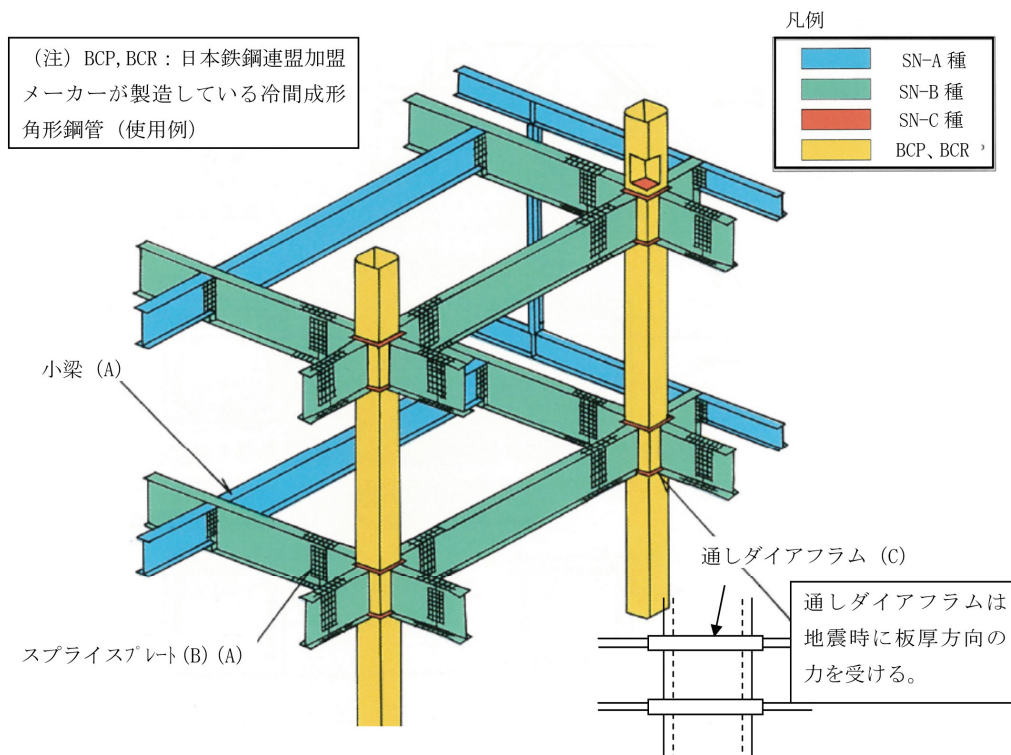


図 3-1 SN 材の使用区分例 (1) : 通しダイアフラム方式の場合

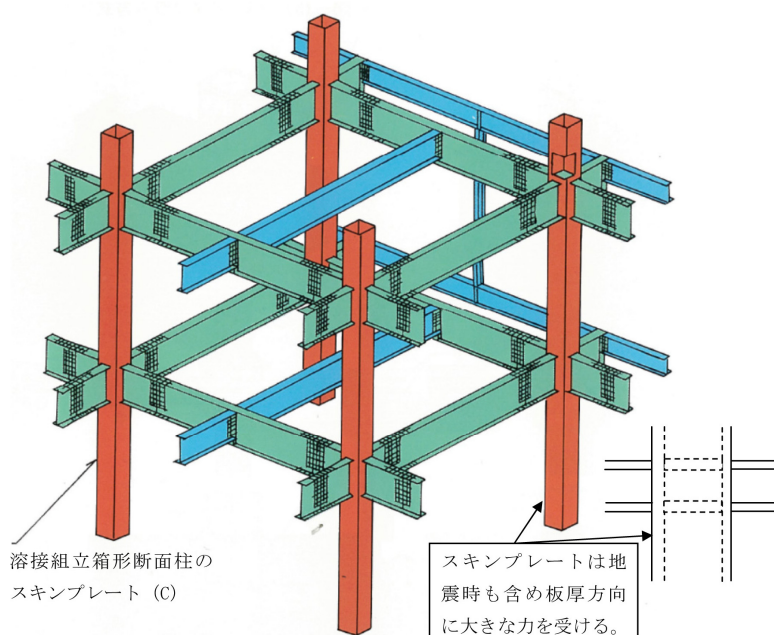


図 3-2 SN 材の使用区分例 (2) : 溶接組立箱形断面柱 (内ダイアフラム形式)

表 3 SN、SS、SM 材の主な規定内容

区分	降伏点	引張強さ	降伏比	伸び	衝撃値	Z 方向絞り	UT	C	Si	Mn	P	S	Ceq
SN-A 種	△ 下限値	○	—	○	—	—	—	○	—	—	○	○	—
SN-B 種	○ 上下限	○	○	○	○	—	△	○	○	○	○	○	○
SN-C 種	○ 上下限	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SS 400	△ 下限値	○	—	○	—	—	—				○	○	—
SM 490A	△ 下限値	○	—	○	—	—	△	○	○	○	○	○	—

注：○：規定あり △：部分的な規定あり —：規定無し

このような方針で制定された SN 材であるので、規定内容は従来の SS、SM 材に比べ増えていることが表 3 からわかる。

また、これまで SS、SM 材の適用範囲に「建築」が入っていたが、建築構造用鋼材の専用規格として SN 材が制定されたことに伴い、用途から「建築」が削除され、規格上では「その他」に入ることとなった（表 1）。ただし、建築基準法で SS、SM 材が使えなくなったということではなく、鋼材のコストや必要とされる性能が考慮された上で、実際には使用されている。

3.5 SN 材規格審議中に問題となった事項

利用者側からの要求事項を基に規格化されたとはいえ、審議中には何点か問題となったが後日、再検討を行うことになったポイントを以下に示す。

- ・ JIS に規定された要求性能値は技術データが蓄積された時点で再審議が必要。
- ・ シャルピー吸収エネルギーの保証の必要性和その値 ($\sqrt{E_0} \geq 27J$) は、次回改正時に見直す。
ただし、現在のところ上記についての改定は行われていない。

4. 最近のじん性要求値 $\sqrt{E_0} \geq 70J$ について

SN 材規格制定にあたっては、SM 材の B 種に規定されていた $\sqrt{E_0} \geq 27J$ が採用された。当時は要求性能が不明確なこともあり、3.5 に示したように「次回改正時に見直す」とされた。

その後、1995 年の兵庫県南部地震では、図 4 に示すように建築鉄骨梁端溶接部でぜい性的な破断が生じた 5)。それを防ぐための研究が精力的に行われ、2003 年に「鉄骨梁端溶接接合部のぜい性的破断防止ガイドライン⁶⁾」が刊行された。

そのなかで、図 5 に示すように梁端部のじん性と継手耐力について実験結果を整理し、梁端部で母材鋼材と同等の耐力を確保するには、溶接部のシャルピー吸収エネルギーは $\sqrt{E_0} \geq 70J$ が必要という結果が述べられている。詳細は省略するが、このガイドラインに沿って構造設計が行われた場合は、

梁スカラップ部母材、梁フランジ母材、ダイアフラム母材及び梁フランジ溶接部の熱影響部のじん性を確認することが求められる。熱影響部のじん性確認は溶接施工試験によることを原則としているが、次式に示す HAZ じん性評価式（鋼材の化学成分からじん性を評価する方法）^{6), 7)}でもよいとしている。

なお、詳細については、ガイドラインをご覧いただきたい。

$$vE_0 \geq 70J: f_{HAZ} \leq 0.58\%$$

$$\text{ただし、} f_{HAZ} = C + Mn/8 + 6(P+S) + 12N - 4Ti \text{ (質量\%)}$$



図4 梁端溶接接合部のぜい性的破断の例⁵⁾（スカラップ底からの破断、矢印：筆者追記）

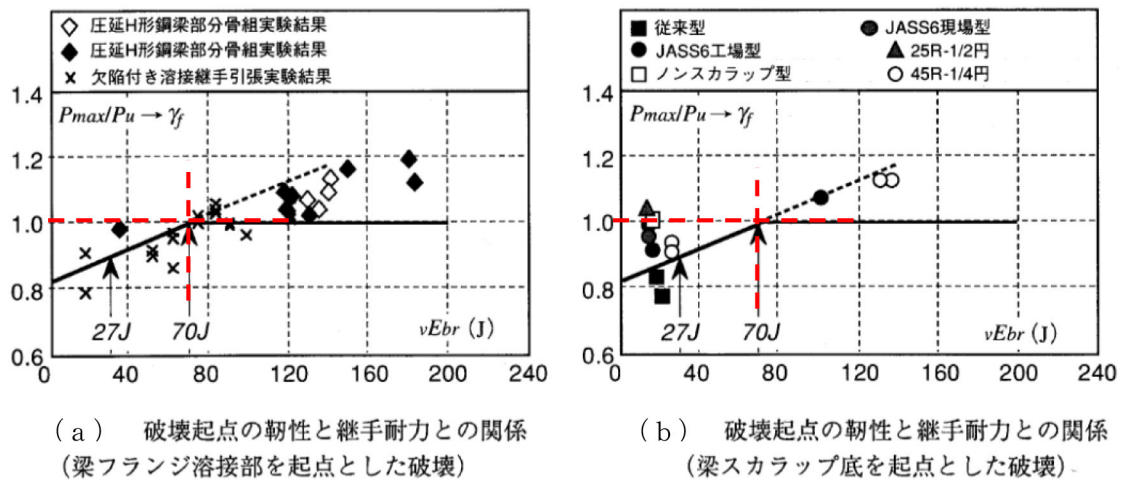


図5 梁端溶接接合部のじん性と継手破断耐力の関係⁶⁾（一部、筆者追記）

5. ダンパー用鋼材とその利用について

一般的な耐震構造では梁の端部に塑性ヒンジを形成させることで地震力のエネルギーを吸収する能力を確保している。これを想定して開発されたのがこれまで述べてきた SN 材である。一方、近年では制振構造といって地震力のエネルギーを柱梁とは別の部材に吸収させる構造設計が行われるようになってきた。そして、この部材を制振ダンパーと称している。

制振ダンパーには、鋼材や鉛、油、粘性体を用いたものが開発されているが、ここではダンパーに

使用される鋼材について簡単に述べる。

鋼材を用いた制振ダンパーの原理は、地震時に柱や梁ではなくダンパーに用いた鋼材を早期に降伏させ、その弾性から塑性にわたる繰返し変形により地震エネルギーを吸収させる、というものである。

そのため、 400N/mm^2 や 490N/mm^2 級鋼材の降伏点（または耐力）に比べ降伏点（または耐力）が低い鋼材が開発されている。日本鉄鋼連盟の製品規定では、建築構造用低降伏点鋼として降伏点が 100N/mm^2 の LY100 と 225N/mm^2 の LY225 について規格を定めている。表 4 にこの材料の機械的性質を示す。

表 4 建築構造用低降伏点鋼の機械的性質⁷⁾

記号の種類	下降伏点又は 耐力 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	降伏比 %	伸び	
				試験片	%
LY100	100 ± 20	200~300	60 以下	5 号	50 以上
LY225	225 ± 20	300~400	80 以下		40 以上

両者とも降伏耐力の幅が 40N/mm^2 で、SN 材の 120N/mm^2 に比べ非常に狭くなっているのが特徴の一つである。

溶接性や高力ボルト接合については一般的鋼材と遜色がないことが確かめられている。ただ、LY100 は降伏点が非常に低いため変形しやすく、変形による硬化が問題となることもあるので運搬や保管には注意が必要である。具体的な注意事項については鋼材メーカーに相談されたい。

図 6 に低降伏点鋼の使用形式を示す。図のように柱や梁に用いるのではなく、ブレースや壁など地震エネルギーを吸収する部位を決めて設置し、場合によっては交換できる配置や取り付け詳細とされている。

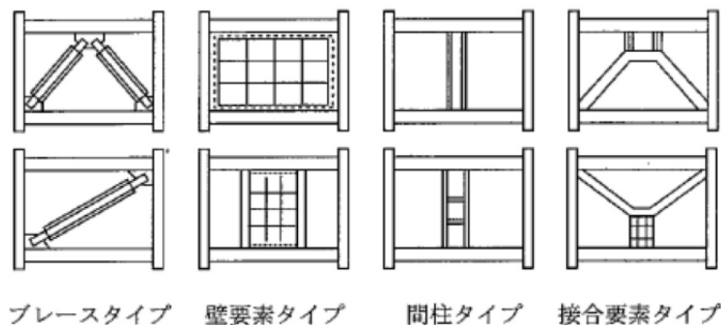


図 6 低降伏点鋼の利用形式⁷⁾

6. おわりに（実設計における鋼材の扱い）

今回は SN 材についてその JIS 制定過程や規格内容、使用を想定している箇所などについて述べた。一方、JIS 規格の規定値と鋼材の持っている実力（性能値）がかけ離れているという現実がある、と筆者は感じている。例えば、SN 材のシャルピー吸収エネルギーの規格下限値は $vE_0 : 27\text{J}$ であるが、そのような低い値の鋼材を普通の製造ラインで作るのはむしろ困難で、3 ケタの値は珍しくない。また、SM 材の JIS 規格に炭素当量の規定が無いといって、溶接性が劣るものでもない。このような事実を把握した上で実際の設計では、SS 材、SM 材も使用されている。

しかし、材料を使う側は、かつての鋼材不具合を再発させないためにも「自分が使おうとしている材料がどのような性能を持っているのか、自分の必要とする性能を満たしているのか」を常に念頭に置いておく必要がある。今後、鋼材に限らず各種材料が開発されると思うが、材料規格を指定する際は、規格内容を常に把握しておかなければならない。

この一文が、読者が SN 材等の規格を理解する際の一助になれば幸いです。

参考文献

- 1) JIS G 316 制定の趣旨と経緯，工業技術院 標準部
- 2) 鉄骨工事技術指針・工場製作編，日本建築学会（2007）
- 3) 溶接接合設計施工ガイドブック，日本建築学会（2008）
- 4) 建築構造用圧延鋼材（SN 鋼材）建築構造用冷間成形角形鋼管，鋼材倶楽部，建設省住宅局建築指導課監修（1996/3）
- 5) 1995 年兵庫県南部地震 鉄骨造建物被害調査報告書，日本建築学会近畿支部（1995）
- 6) 鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破断防止ガイドライン・同解説，日本建築センター（2003）
- 7) 新しい建築構造用鋼材第 2 版，鋼構造出版，日本鉄鋼連盟編（2008）

<略歴>

護 雅典（もり まさのり）

1972 年 早稲田大学 理工学部 建築学科 卒業

1974 年 早稲田大学大学院 建築構造専攻 修了

1974 年 株式会社竹中工務店 入社

2009 年 信州大学大学院工学研究科 博士（工学）

現在に至る

<資格>

一級建築士

構造設計一級建築士