鋼素材特性を反映させた鋼構造部材の塑性変形能力評価に関する研究

A STUDY ON ESTIMATE FOR PLASTIC DEFORMATION CAPACITY OF
STEEL MEMBERS REFLECTED MATERIAL PROPERTIES

鈴木 敏 郎*, 五十嵐 規矩夫**, 薩 川 恵 一***

Toshiro SUZUKI, Kikuo IKARASHI and Keiichi SATSUKAWA

This paper describes estimation method for plastic deformation capacity of steel members. When we estimate steel members with present recommendation, it is difficult to say that we can estimate plastic deformation capacity of steel member between some kinds of steel. Because this recommendation do not consider modulus in plastic region. So we suggest new recommendation to contain the factor of material properties in the plastic region. We compare the estimate method of this study with the estimate method of the present recommendation. As a result, the method of this study is showing a good correspondence between some kinds of steel.

Keywords : material property, member, plastic deformation capacity, local buckling, yield stress
素材特性, 部材, 塑性変形能力, 局部座屈, 降伏応力度

§1. 序

鋼素材特性を把握するための因子としては, 上下降伏応力度, 降伏棚の有無, ひずみ硬化勾配, 引張強さ, 一様伸び, 降伏比等が挙げられる。このように鋼材の素材特性を反映する上で様々な因子があるにも関わらず, 塑性変形能力などの部材性能評価に用いられる鋼材の機械的性質としては, 降伏応力度を用いることが主流である。また文献1)では建築構造用部材が塑性変形能力を向上するための材料特性の一つとして降伏比をあげている。降伏比を低く抑えることにより部材の塑性化領域が拡大し, それに伴い部材の塑性変形能力が大幅に向上するとしている²⁾。このような流れの中で, 著者等は塑性域での応力ひずみ経路が同じものの降伏点付近の経路の異なる2種類の鋼材を対象として, 梁の載荷実験および数値解析を行い, 2種類の鋼材の性状について検討している³⁾。その結果, 梁の無次元化荷重変位関係において最大耐力, 最大耐力時変位量に大きく差が生じるものの実体の荷重変位関係において差異はみられないという知見を得た。この知見から著者らは単に降伏応力度のみで塑性変形能力を評価するのではなく, 部材の塑性変形能力を決定すると思われる塑性域での材料特性を反映させた形で, 部材の塑性変形能力を評価する必要があると考える。そこで文献4)では, この2種類の鋼材からなる部材を統一的に評価することを検討している。そして塑性変形能力を評価する際の評価因子として, 鋼材の塑性域を反映させた二次勾配と新たな降伏応力度を提案し, その評価因子により修正している幅厚比を用いて塑性変形能力を評価した結果, 降伏応力度のみを用いて幅厚比を修正する従来の方法に比べてばらつきが少なく, その有効性を確認している。文献4)では塑性域での応力ひず

み経路が同一の2種類の鋼材を対象としたが, 本研究では塑性域での応力ひずみ経路や降伏点異なる各種鋼材に対象領域を広げて, 文献4)で提案している評価方法により各種鋼材を用いた部材の塑性変形能力を整理することを目的とする。

近年では, 建築構造用の鋼材として, 様々な鋼材が開発され, その使用に関しても実用化の段階にきている。部材の塑性変形能力を確保するために, 各種指針において幅厚比規定が設けられているが, 各種鋼材を用いた場合の幅厚比規定に対しては, 文献12)を参考にすれば, SS400材を用いた場合の幅厚比規定にF値を用いて換算して規定しているのが現状であろう。あくまでも使用される鋼材特性としては降伏応力度のみであり, 塑性域の鋼材特性が反映された形で幅厚比規定がなされていない。これはいかなる鋼材を用いた場合においても, 降伏応力度あるいはF値で部材の塑性変形能力評価が可能であるという考えに基づいている。現行の降伏応力度を規定する時には上下降伏点で取る場合, 0.2%オフセット法で取る場合など, 応力度ひずみ度関係における降伏棚の有無や経路の違いにより, その都度異なっている。

しかし文献4)でみたように, 耐震設計上必要とされる塑性変形能力を有するための幅厚比の範囲では, 鋼材の塑性域での応力度ひずみ度曲線が同一である時に降伏点付近の経路の違いが塑性変形能力に及ぼす影響は少なく, 降伏応力度のみを塑性変形能力評価に用いることは, 部材の統一的な評価を行う上で困難を伴う結果となる。従って各種鋼材を用いた部材の塑性変形能力を統一的に評価するためには, 個々の鋼材の塑性域における特性を反映させることが必要であり, 文献4)で提案している手法が有効であると考えられる。

* 鋼構造材料研究会 代表・工博

** 東京工業大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

*** 東京工業大学大学院博士後期課程 修士(工学)

Kouzouzairyou Kenkyukai, Co., Ltd, Representative, Dr. Eng

Assoc Prof, Dept of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr Eng

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M Eng

本研究では各種鋼材を用いた部材の塑性変形能力を統一的に評価することを目的とするが、その際鋼材の塑性域における剛性をどのように評価するのが問題となる。文献4)ではその基本的な考え方について示しているが、本研究においてもその考えに基づき、部材が最大耐力を迎えた時点における圧縮フランジ軸方向ひずみ度を参考にし、評価に用いる際の鋼素材の塑性域における剛性を得る。これを各種鋼材について求め、文献4)で提案する降伏応力度と二次勾配を用いて、各種鋼材を用いた部材の塑性変形能力を統一的に評価する。

様々な鋼材を用いた部材の塑性変形能力を統一的に評価するという観点にたった研究としては、小野等の一連の研究がある^{5)~7)}。これらの研究では、鋼材の修正補エネルギーに着目し、部材の塑性変形能力を統一的に評価する指標として提案している。

まず本研究では、簡単な板の数値解析を通して、降伏応力度と塑性化後の二次勾配が、部材の塑性変形能力にどのような影響を及ぼすかを検討し、塑性変形能力の評価を行う時には二次勾配を考慮に入れる必要があることを示す。そして現在建築用鋼材として使用されている、あるいは使用が検討されている鋼材の機械的性質について概観し、その機械的性質の特徴を整理した上で応力度ひずみ度関係の簡単なモデル化を行う。その後このモデル化した応力度ひずみ度関係を用いて、等曲げを受ける梁を対象に塑性変形能力評価を試みる。そして本研究で提案している塑性域を反映した二次勾配と降伏応力度を最大耐力時のひずみ度を参照しながら各鋼材ごとに算出する。最後に本研究で提案している評価方法と従来の評価方法との比較検討を行い、本研究の評価方法により各種鋼材を用いた場合においても統一的な評価が可能であることを示す。

§2. 本研究で提案する評価因子とその評価因子が部材の塑性変形能力に与える影響

図1は、本研究で提案する部材の塑性変形能力を評価する際に用いる降伏応力度と二次勾配の概念図を示している⁴⁾。このような評価因子をとる理由は、降伏点近傍の応力度ひずみ度関係は部材の大変形時の挙動に大きな影響を及ぼさないことと、なるべく簡便な方法で評価するためである。

本研究で提案している降伏応力度と二次勾配が板の塑性変形能力に与える影響について把握するために降伏応力度と二次勾配を変数として数値解析を行う。解析モデルは図2に示すように等曲げモデルの圧縮側フランジ部分を取りだしたものを仮定するために、解析の支持条件は図に示すように3辺が単純支持、1辺が自由端として純圧縮を受けるものとする。解析で使用する材料特性は弾性勾配と二次勾配を変数としてbi-linear型を用いる。板の形状は図2中に示すように設定し、幅厚比を8.3と6.0の2種類のもので行っている。また板厚方向を5分割、板幅を6分割、長さ方向を18分割して四辺形要素を用いて解析を行っている。なお解析プログラムはABAQUS5.8-1を用いている。

解析結果を図3に示す。縦軸に板の塑性変形能力をとり、横軸に二次勾配の平方根をとって降伏応力度ごとに塑性変形能力を整理したものである。なお幅厚比8.3のものを実線で示し、幅厚比6.0のものを点線で示している。現在使用されている鋼材の二次勾配の平方根の値は、3から5程度であることを考えると、この範囲ではどの降伏応力度においても二次勾配の平方根と塑性変形能力はほぼ直線

図1 本研究で提案する鋼素材特性決定法

図2 解析モデル

図3 二次勾配が板の塑性変形能力に与える影響

関係にあり、二次勾配が増加するほど塑性変形能力も増加することを示している。また幅厚比が小さくなると、降伏応力度が小さくなるにつれてその直線の勾配は大きくなっている。このようなことから降伏応力度が小さいものほど、二次勾配がその塑性変形能力に影響を与えることがわかり、塑性変形能力を評価するには二次勾配を考慮する必要がある。

§3. 各種鋼材における塑性変形能力評価のための評価因子の抽出

3.1 各種鋼材の材料特性の把握と応力度ひずみ度関係のモデル化

本研究で対象とする鋼材は、建築分野において現在広く使用されているもの及び使用が検討されているものを対象とする。ここでは、その代表的なものとして、SS400, SM490, SA440, HT590, HT780を取り扱う。これら鋼材の機械的性質については著者等が最近数年にわたり様々な実験を行った材料試験結果から収集した。採取した試験片は板厚6mm以上の平板あるいはH形鋼を構成する板要素から切り出したものに限定している。またいずれもJIS1A号引張試

図4 本研究で使用した鋼材の応力ひずみ関係

験片による結果である。その応力度ひずみ度関係を図4に示す。またこれらの鋼材が有する機械的性質を平均値で表に示す。

これらの材料試験結果をもとに本研究の数値解析に用いる鋼材の応力度ひずみ度関係のモデル化を行った。まず各鋼材について、降伏応力度 σ_y とひずみ硬化開始ひずみ ϵ_{st} を決定した。 σ_y は図4で平均した値を近似的に表1中に示す値にして、降伏棚の長さは、SS400, SM490, SA440, HT590, HT780のそれぞれの降伏ひずみの19, 14, 8, 4として、ひずみ硬化開始ひずみを表1中のように決定した。またひずみ硬化開始以降の曲線に関しては対数関数を使用することにして以下のような式(1)で表した。

$$\sigma = \alpha \cdot \log(1 + \beta \cdot \epsilon) \quad (1)$$

鋼材の応力度ひずみ度曲線の数式表現については分数関数式、 n 乗硬化式、Menegotto-pinto Model, 修正 Menegotto-pinto Model, Ramberg-Osgood Modelなどの数式表現があり、文献6), 8) ~11)等で紹介され、またこれらの式と様々な鋼材の材料試験結果との比較を行っている。このような式を利用することにより正確な数式表現が可能であるが、本研究ではなるべく簡便にすべての鋼材に適応できるものとして対数関数を採用した。この対数関数は真応力と対数ひずみの関係で取り扱っている。この式中の係数 α, β に関しては、表1中に示している。このようにモデル化した曲線を図4中の実線で示す。モデル化した応力ひずみ度関係は引張試験結果との対応もよく、各鋼材の塑性域での材料特性を良く反映した形になっている。

3.2 塑性変形能力評価因子の抽出

ここでは前節でモデル化した鋼材特性を用いて数値解析を行い、塑性変形能力評価因子の抽出を行う。まず本研究における数値解析の妥当性を示すために、文献4)で行った実験結果と数値解析との対応を検証する。解析で用いた材料定数は文献4)で行った材料試験結果を使用している。なお解析プログラムはABAQUS5.8-1を用いている。図5に実験結果と数値解析結果との対応を示す。実験結果と

図5 実験と解析との対応

解析結果は概ね良い対応を示しており、本解析は妥当であると言える。

次に前節でモデル化した鋼材特性を用いて数値解析を行う。再度本研究の数値解析で使用する各鋼材の材料特性を図6に示す。また数値解析モデルは、基本的なフランジ局部座屈性状を捉えるために、図7に示す4点曲げを受けるH形鋼梁であり、本研究で対象としているのは解析モデル中央の等曲げを受ける部分である。解析モデルの形状を図7の図中に示す。そしてフランジ板厚を変えることで適宜フランジ幅厚比を変数にして数値解析を行う。また板厚方向を5分割、梁幅を10分割、梁せいを20分割、解析モデル中央の等曲げを受ける部分の長さを40分割して四辺形要素を用いて解析を行っている。なお数値計算の簡略のため、試験体の中央を対称条件に設定して数値解析を行っている。また横方向への移動を拘束するために圧縮フランジとウェブの接合線上の節点を適宜拘束している。

各種鋼材及びフランジ幅厚比を変化させて行った数値解析結果をもとに文献4)の方法に従い最大耐力時のひずみ度を座屈ひずみ

($\epsilon_{\max}$)と定義する。この $\epsilon_{\max}$ をもとに、本研究における塑性変形能力評価因子を決定する。ただし $\epsilon_{\max}$ は試験部分長さ中央の圧縮フランジ局部座屈発生位置での要素の表裏のひずみ度を平均した値である。この $\epsilon_{\max}$ とフランジ幅厚比の関係を示しているのが図8である。黒印は各鋼材の座屈ひずみがひずみ硬化開始ひずみよりも大きいものを示し、また白抜き印は座屈ひずみがそれよりも小さいものを示している。また点線および実線は、座屈ひずみがひずみ硬化開始ひずみよりも大きいものを対象とした回帰曲線である。この座屈ひずみを用いて本研究で提案する二次勾配を算出するためのひずみ度の範囲を決定する。また図中には文献12)に示されている幅厚比制限を参照して記載している。各鋼材ごとの幅厚比規定値を表1に示している。ただしすべてF値換算により、規定値を算出している。

全体の傾向として降伏応力度の低い鋼材ほど座屈ひずみが大きいものの、各鋼材の座屈ひずみの増加割合は降伏応力度の低い鋼材のものほど緩やかになっている。降伏棚を有する鋼材では白抜き印と黒印を境に座屈ひずみの値が急激に増している。その急激に増すところの座屈ひずみは、ほぼひずみ硬化開始ひずみに相当する。そしてひずみ硬化に入って座屈する時の幅厚比のものは降伏棚で座屈する時の幅厚比のものよりも塑性変形能力が向上しており、塑性変形能力を十分に有するものになる。このようなことから二次勾配を決定する場合にはひずみ硬化開始ひずみ以降で座屈ひずみの範囲でとることが塑性域での二次勾配として捉えることができる。

二次勾配を算出するための座屈ひずみの範囲を決定するために、便宜上文献12)で示されている幅厚比規定を参考にする。二次勾配を決めるための座屈ひずみの範囲を本研究では図中に示すようにFBランクに相当する幅厚比の座屈ひずみとFAランクに相当する幅厚比の座屈ひずみの範囲の2倍とした。そのときの幅厚比をFA'とする。この幅厚比の範囲は建築構造用部材としてよく用いられる標準の形鋼の幅厚比の範囲に相当する。その幅厚比の範囲に相当するひずみの範囲を表2に示す。このひずみの範囲は応力度ひずみ度関係と比較するとひずみ硬化開始ひずみ付近から始まっており、降伏応力度が高い鋼材ほど、その範囲は大きくなっている。そしてこのひずみの範囲で二次勾配をとることにより、本研究で提案している手法で部材の塑性変形能力を評価するときに良い対応を示している。

図8で決定した範囲をもとに本研究で提案する降伏応力度(σ_t)と二次勾配($E\epsilon$)を決定する。二次勾配は各鋼材において表2で示した範囲における応力度ひずみ度関係より最小二乗法を用いて回帰直線を算出して、その直線の勾配を二次勾配($E\epsilon$)とする。そして図1に示す手法により算出した直線と弾性線を延長し交わった点を降伏応力度(σ_t)としている。以上の方法で求めたものを図9に示す。図中の実線は各鋼材毎に求めた二次勾配を示している。また表2にその算定した結果を示す。降伏棚を有する鋼材の降伏応力度(σ_t)は従来の降伏応力度とほぼ同じ値を示すが、降伏棚を持たないSA440の降伏応力度(σ_t)は従来の降伏応力度の値と違ったものとなっている。

本研究の評価方法は、現在使用されている鋼材あるいは使用段階にきている鋼材を対象として鋼材の応力度ひずみ度関係により簡便な方法で求められる評価因子により部材の塑性変形能力を統一的に評価することを目的としたものである。また降伏応力度と二次勾配を別々な評価因子として捉えるのではなく、同時に扱うことにより評価するものである。その鋼材を使用した場合の幅厚比制限値をも

図6 解析に使用する鋼材の解析モデル

表1 解析で使った鋼材の材料定数

Steel	SS400	SM490	SA440	HT590	HT780
$\sigma_y(\text{t/cm}^2)$	3.0	3.5	4.0	5.5	8.0
$\epsilon_{st}(\%)$	2.7	2.4	0.0	2.2	1.4
$\epsilon_{sh}(\%)$	23.0	17.0	11.5	11.5	7.0
α	2.4	3.4	1.8	1.8	0.2
β	300	100	500	500	190
FA*1	8.1	7.5	6.9	5.9	4.9
FB*1	9.8	9.1	8.5	7.2	6.0

1各鋼材のFA,FB値は文献)のSS400のFA,FBに $\sqrt{240}$ を乗じたもの

図7 解析モデル

図8 幅厚比と座屈ひずみの関係

図9 塑性域を考慮した二次勾配と降伏応力度

表2 塑性変形能力評価因子

Steel	SS400	SM490	SA440	HT590	HT780
$\sigma_t(\text{t/cm}^2)$	2.6	3.5	5.3	5.2	8.0
$E_t(\text{t/cm}^2)$	21	23	16	16	8
range(%)	2.8~4.8	2.9~5.2	2.3~4.3	2.6~5.9	2.8~7.1

とにして決定される応力度ひずみ度曲線の範囲での平均勾配をその鋼材の二次勾配として扱い、その二次勾配と二次勾配を考慮して得られる降伏応力度の2つの因子を用いて幅厚比を修正し、その幅厚比で部材の塑性変形能力を評価する。

§4. 各種鋼材を用いた部材の塑性変形能力評価

4.1 従来の評価方法と本研究で提案する評価方法との比較

図10, 11は横軸にフランジ幅厚比を変数として塑性変形能力を整理したものである。図10の横軸には通常用いられる降伏応力度と弾性係数を考慮して得られる等価幅厚比を用いている。これに対して図11の横軸には、本研究で提案している塑性域を反映した二次勾配

(E_t)と降伏応力度(σ_t)を用いて幅厚比に修正を加えたものである。なお、縦軸の荷重を無次元化するときの降伏応力度は本研究で提案している塑性域を反映した降伏応力度を用いている。

図10では各鋼材ごとに何らかの曲線に近似しており、鋼材毎に幅厚比を用いて塑性変形能力を評価することは可能である。しかし鋼材間で比較してみると、図11と比較してばらつきがみられる。この図10の横軸に用いられている等価幅厚比は、板要素の座屈応力度が指標となっていることから鋼材の塑性域での鋼材の材料特性が十分反映されず、その結果として図11と比較してばらつきがみられる。一方図11では、図10に比べて良い対応を示しており、何らかの近似曲線で示することができる。従って塑性変形能力を評価する際には本研究で提案している塑性域を反映した二次勾配(E_t)と降伏応力度(σ_t)で幅厚比を修正したものを用いることが有効であることがわかる。そして点線はすべての鋼材を対象としてひずみ硬化開始ひずみ以降で座屈したものを近似曲線で示したものである。本研究ではこの近似曲線を梁の塑性変形能力を統一的に評価する式として以下の(2)式を提案する。

$$\theta/\theta_p = 1.5 \times 10^{-2} \cdot \left(\frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_t}{E_t}} \right)^{-2} \quad \text{.....(2)}$$

二次勾配を算出するための座屈ひずみの範囲を決定するために、便宜上文献12)で示している幅厚比規定を参考にしている。その決定した座屈ひずみの範囲以下にある白抜き印で示す降伏棚で座屈した幅厚比においても一部で近似曲線から離れているものの、従来の評価方法に比べて良い対応を示している。またその決定した座屈ひずみの範囲以上の座屈ひずみに相当する幅厚比においても、近似曲線と良い対応を示している。つまりある限定した座屈ひずみの範囲で二次勾配を算出したが、その決定した座屈ひずみの範囲外で座屈する幅厚比の塑性変形能力を評価する上でも式(2)で示す近似曲線に対応できることを示している。このことは本研究で提案している二次勾配は弾性剛性と塑性域の剛性とが混在する降伏棚領域においても、またその座屈ひずみ範囲以上の領域の剛性においても対応していることを示し、塑性域での平均した剛性として捉えることができ

図10 通常の方法を用いたときの塑性変形能力評価

図11 本研究で提案する塑性変形能力評価

る。このようなことから、本研究で示す座屈ひずみの範囲で二次勾配を決定することはかなり有効であることを示している。

4.2 無次元化荷重変位関係に及ぼす降伏応力度の影響

図12, 13に解析で行った無次元化荷重変位関係を示す。図12は降伏応力度と弾性勾配を評価の指標として用いている等価幅厚比の値が0.3付近での各鋼材の無次元化荷重変位関係を示している。なお無次元化を行う際は従来の方法で得られる降伏応力度を用いている。一方、図13は本研究で提案している塑性域を反映した二次勾配($E\epsilon$)と降伏応力度(σ_f)で幅厚比を修正したときの値が3.2付近のときの各鋼材の無次元化荷重変位関係を示している。そして無次元化を行う際は本研究で提案している降伏応力度(σ_f)を用いている。また縦軸の荷重は試験体部分に加わるモーメントを全塑性モーメントで、横軸の変位は端部回転角を全塑性モーメント時の弾性回転角でそれぞれ無次元化したものである。なお図中の▼は最大耐力点を示している。図12では従来の降伏応力度を用いているので、すべての鋼材において線形関係から離れるところは同じであるが、その後の塑性域に入ってから挙動は鋼材間においてかなり違うものとなっており、各種鋼材間の最大耐力時変位置量、最大耐力に大きな差が現れている。このことから降伏応力度のみを用いて部材の塑性変形能力を評価することは、塑性域での鋼材の材料特性を反映しておらず、その結果として無次元化荷重変位関係において各鋼材間において大きな差が生じることになる。

これに対して図13に示す無次元化荷重変位関係では線形関係から最大耐力までの挙動は違うものの、最大耐力時変位置量、最大耐力は図11と比較して各鋼材間の差異がなくなっている。従って本研究で提案する塑性域を反映した二次勾配と降伏応力度を用いることにより、降伏応力度のみを用いた従来の評価方法に比べてよい対応を示している。

§ 5. 結

本研究は、数値解析を通して文献4)で提案している評価方法の対象領域を現在建築用部材として使用されているあるいは使用が検討されている鋼材に広げて、各鋼材を用いた場合の部材の統一的な塑性変形能力評価を試みた。その際に降伏応力度と二次勾配が板要素の塑性変形能力に与える影響について検討を行い、降伏応力度ばかりでなく、二次勾配を考慮して塑性変形能力を評価する必要があることを示した。さらに各種鋼材ごとに塑性変形能力を評価するための評価因子である塑性域を反映した二次勾配と降伏応力度を抽出した。その中で二次勾配を決定するためのひずみ度の範囲について検討し、この二次勾配が塑性域での平均勾配として捉えられることを示した。最後に本研究で提案する塑性域を反映した二次勾配と降伏応力度の二つの評価因子により修正している幅厚比で部材の塑性変形能力を評価したものと従来の降伏応力度により修正している等価幅厚比で部材の塑性変形能力を評価したものととの比較を行い、本研究で提案する評価方法が従来の評価方法よりもよい対応を示し各種鋼材間における統一的な評価が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 加藤 勉 高張力鋼の高層建築物への利用, 製鉄研究, 第321号, pp 1~7, 1986

図12 σ_y を用いた場合の無次元化荷重変位関係

図13 σ_f を用いた場合の無次元化荷重変位関係

- 2) 加藤 勉, 建設用鋼材の降伏比について, 鉄と鋼, 第6号, pp 11~21, 1988
- 3) 鈴木敏郎, 小河利行, 五十嵐規矩夫, 小幡 学 降伏比の異なる鋼材を用いた高張力鋼梁の塑性変形性能に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No 476, pp 169~176, 1995 10
- 4) 鈴木敏郎, 五十嵐規矩夫, 薩川恵一 鋼構造部材の塑性変形能力に及ぼす鋼素材特性の影響, 日本建築学会構造系論文集, No 517, pp.141~148, 1999 3
- 5) 小野徹郎, 尾崎 亮, 岩田 衛 補エネルギーによる素材特性と部材変形性能に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 1139~1140, 1993.9
- 6) 小野徹郎, 上之郷貴重, 吉田文久, 岩田 衛, 林 賢一 金属系素材の素材特性及び履歴挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No 498, pp.137~143, 1997.8
- 7) 小野徹郎, 吉田文久 H 形断面短柱の変形性能に及ぼす素材特性の影響に関する研究その1, 日本建築学会構造系論文集, No. 503, pp.125~129, 1998 1
- 8) 佐藤篤司, 小野徹郎 金属系素材の応力-歪度関係の再現に対する相対的評価及び考察(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.321~322, 1999.9
- 9) 佐藤篤司, 小野徹郎, 加古康也 金属系素材の履歴型応力-歪度関係の定式化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 583~584, 1998.9
- 10) 青木博文, 増田正之 素材引張試験結果による構造用鋼材の力学的性質に関する統計的調査, 日本建築学会構造系論文集, No 358, pp 125~129, 1985 12
- 11) 青木博文, 加藤 勉, 丁 峰 高炉厚板鋼板の機械的性質と応力ひずみ関係の数式表示, 日本建築学会構造系論文集, No 398, pp 73~85, 1989.4
- 12) 日本建築センター 建築物の構造規定, 1994

(1999年12月10日原稿受理, 2000年4月17日採用決定)