

鋼材特性を考慮した圧縮板の極限強度と塑性変形能力について

ULTIMATE COMPRESSIVE STRENGTH AND PLASTIC DEFORMATION CAPACITY
OF STEEL PLATE IN CONSIDERATION OF MATERIAL PROPERTIES

森 脇 良 一 *

By Yoshikazu MORIWAKI

Lately the ultimate limit state design has become general interest concerning with steel structures. Attention should be paid to plastic deformation capacity such as ductility and toughness as well as ultimate strength in the ultimate limit state design.

It is the purpose of this paper to clarify theoretically not only the relation between ultimate strength, deformation capacity and material properties, but the properties suitable for ultimate limit state design. Analysis has been done by FEM and compressive steel plate has been studied in consideration of strain hardening.

1. まえがき

溶接構造物にとって、十分な構造安全性を確保するという観点から、使用鋼材をいかに選択すべきかは重要な課題である。構造物の効率的な設計などを考えて、高張力鋼が使用されることが多いが、調質高張力鋼の材料特性を考えた場合、加工硬化能や靱性などの点で問題があり、建築の骨組構造物では材料の降伏点や一様伸びの値について、種々の議論がなされてきている^{1)~11)}。

ところで土木の鋼構造の関係では、現行の許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行するという大きな流れがある。限界状態設計法では極限強度のみならず、塑性変形能力も重要な評価指標となると考えられる。いっぽう我が国での製鋼・圧延技術の進歩には目覚ましいものがあり、T M C P (Thermo Mechanical Control Process) などにより、鋼材の機械的性質を幅広く制御しうることが現在ではある程度可能となってきた^{12)~15)}。

このような背景を踏まえて、これまで純圧縮を受ける自由突出板のねじれ座屈に焦点を絞って、現行の60キロ級(570N/mm²)焼入れ焼もどし高張力鋼(以下Q T鋼という)とT M C Pによる60キロ級低降伏比高張力鋼(以下L Y鋼という)との比較検討¹⁶⁾、および現状の60キロ級Q T高張力鋼と軟鋼との比較¹⁷⁾を行ってきた。これらでは単に極限強度のみならず、延性(ダクティリティ)や靱性(タフネス)についても検討しているのは勿論のことであり、さらに対象とする断面も現在常用されているセミコンパクト断面や薄肉断面のものに加えて、今後の多用化をにらんだ上で塑性断面やコンパクト断面のものについても検討を加え

* 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)

てきている。

本研究は上記一連の研究の一環として実施してきているものであって、鋼板構造の基本構成要素である圧縮板を対象として、その極限強度および変形性能と鋼材特性との関連性を理論的に解明するとともに、極限強度のみならず変形性能をも評価基準とした上で、限界状態設計法に適した鋼材特性とはいかなるものかを明らかにすることを目的とするものである。

2. 解析法

本解析では、ひずみ硬化領域まで考慮できる弾塑性有限変位解析法¹⁸⁾によって解析を行った。

(1) 仮定

a) 鋼材の材料に対する仮定

- ①等方等質性である。②von Mises の降伏条件に従う。③Prandtl-Reuss の塑性流れ理論に従う。
- ④ひずみ硬化領域では、等方性ひずみ硬化則に従う。

b) 変位に対する仮定

- ①変形前板の中立面に垂直であった線素は、変形後も中立面に垂直である。
- ②各荷重の増分段階のはじめにおいては、そのときの節点変位に基づく平面三角形有限要素で構成される折板構造を初期形状として考える。

(2) 弾塑性応力-ひずみマトリックス

$$D_{EP} = D_E - \frac{D_E \{ \partial f / \partial \sigma \} \{ \partial f / \partial \sigma \}^T D_E}{\{ \partial f / \partial \sigma \}^T D_E \{ \partial f / \partial \sigma \} + H'} \quad (1)$$

ここに、 D_{EP} : 弾塑性応力-ひずみマトリックス D_E : 弾性応力-ひずみマトリックス

σ : 応力ベクトル

平面応力場 $\sigma = \{ \sigma_x; \sigma_y; \tau_{xy} \}$ のとき、

$$f = (\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} = \sigma_v = k \quad (2)$$

$$H' = dk/d\varepsilon_p \quad (3)$$

ここに、 σ_v : 相当応力 ε_p : 相当塑性ひずみ H' : ひずみ硬化率

応力、ひずみを相当応力 σ_v 、相当ひずみ ε_v に直して、応力-ひずみマトリックス D を図-1 のようにおいた。 D の判定については、

$$\sigma_v < \sigma_y \quad \text{および除荷時} \quad D = D_E \quad (4)$$

$$\sigma_v \geq \sigma_y \quad \text{のとき} \quad \begin{aligned} \varepsilon_v < \varepsilon_{st} \quad \text{ならば} \quad D &= D_P \\ \varepsilon_v \geq \varepsilon_{st} \quad \text{ならば} \quad D &= D_H \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 ε_{st} : ひずみ硬化開始ひずみ

σ_y : 降伏応力度

D_P : 式(1) で $H' = 0$ とした時の D_{EP}

D_H : H' が与えられる時の D_{EP}

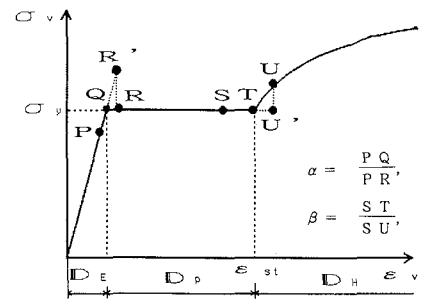


図-1 応力-ひずみマトリックス (D)

図-1において、変形前に弾性領域 P にあった要素が荷重増分後降伏点を越えて塑性領域 (踊り場) R に移行する場合、また塑性領域 S にあった要素がひずみ硬化領域 U に移行する場合には、 D は次式で表される。

$$D = \begin{cases} \alpha D_E + (1 - \alpha) D_P & (P \rightarrow R) \\ \beta D_P + (1 - \beta) D_H & (S \rightarrow U) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 $\alpha = \frac{\text{降伏に至るまでのひずみ増分}}{\text{全ひずみ増分}} \quad (0 \leq \alpha \leq 1)$

$\beta = \frac{\varepsilon_{st}\text{に至るまでのひずみ増分}}{\text{全ひずみ増分}} \quad (0 \leq \beta \leq 1)$

なお α は相当応力 σ_v が σ_y に等しくなること、 β は相当ひずみ ε_v が ε_{st} に等しくなることより、図-1中の式を用いて求められる。

ひずみ増分から応力増分を計算する時にひずみ増分を弾性領域と塑性領域に、また塑性領域とひずみ硬化領域に分解してそれぞれについて応力を求める。

(4) 応力－ひずみモデル

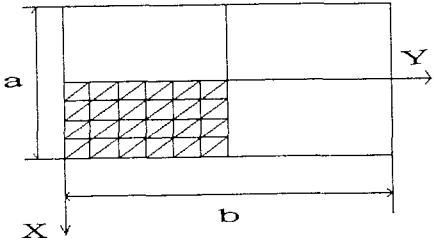
一般に縦軸に σ/σ_y 、横軸に $\varepsilon/\varepsilon_y$ をとった真応力－ひずみ関係では、ひずみ硬化領域における応力－ひずみ関係は曲線で表される。それをさらに両対数目盛りのグラフに示すと直線で表される。従ってひずみ硬化領域における応力－ひずみモデルを次式のようにおく。

$\sigma/\sigma_y = B (C + \varepsilon/\varepsilon_y)^n \quad (7)$

3. 解析モデル

(1) 境界条件および要素分割

境界条件は周辺単純支持とし、圧縮荷重については $X=a/2$ において一様圧縮変位を導入することにより与えた。図-2に示すように変形の対称性から、圧縮板の1/4を取り出し解析モデルとした。要素分割は4×6つまり X方向には 4分割、Y方向には 6分割とした。



図－2 解析モデルの要素分割

(2) 幅厚比と縦横比

鋼材の機械的性質が異なっても、Rの大きい領域では顕著な挙動変化は現れず、その挙動に鋼種による違いが現れてくるのは $R \leq 0.5$ の領域である¹⁸⁾。したがって、ここでは $R = 0.3$ および 0.5 とし、それらに対応する b/t の値を表-1に示す。また縦横比は初期たわみの影響が1.0 よりも大きい0.5 とした¹⁸⁾。なお板厚は、12mmとしている。

(3) 初期たわみおよび残留応力

表－2 鋼材の機械的性質

表－1 幅厚比 b/t の値

$R \setminus YR$	0.7	0.77, 0.9
0.3	12.755	11.249
0.5	21.258	18.748

鋼材	Y. R.	σ_u	σ_y	ε_y	ε_{st}	ε_u	B	n	C
		(N/mm ²)		(× 10 ⁻⁶)					
HY1	0.77	686	529	2572	2572	100000	1.007	0.0951	-0.0953
HY2	0.77	686	529	2572	2572	200000	0.636	0.2030	8.2375
H11	0.77	686	529	2572	10000	100000	1.045	0.0870	-3.3014
H12	0.77	686	529	2572	10000	200000	0.672	0.1929	4.1980
Q11	0.90	588	529	2572	10000	100000	0.842	0.1003	1.9700
Q12	0.90	588	529	2572	10000	200000	0.386	0.2566	33.0780
Q21	0.90	588	529	2572	20000	100000	0.900	0.0859	-3.7269
L11	0.70	588	412	2000	10000	100000	1.132	0.0859	-4.8193
L12	0.70	588	412	2000	10000	200000	0.747	0.1825	0.0765

上表中 σ_u : 引張強度 σ_y : 降伏点 ε_y : 降伏ひずみ ε_{st} : ひずみ硬化開始ひずみ
 ε_u : 一様伸び B: ひずみ硬化係数 n: ひずみ硬化指数

初期たわみ波形は式(8)に示す三角関数であると仮定し、 W_0 は道路橋示方書の許容値である $b/150$ とした。

$$W_0(X, Y) = W_{0\max} \cos(\pi X/a) \sin(\pi Y/b) \quad (8)$$

いっぽう溶接による残留応力は、自己平衡となるように矩形分布として X軸方向のみに導入し、残留引張応力は $0.9\sigma_y$ 、残留圧縮応力は $-0.2\sigma_y$ とした。

(4) 鋼材の応力-ひずみ曲線

本研究では検討しようとする鋼材としては、表-2に示すように σ_u は 590N/mm^2 、 σ_y は 530N/mm^2 を主として、降伏比（以下 YR という）は 0.70 、 0.77 と 0.90 の 3 種類 ε_{st} については 0.01 、 ε_u については 0.1 と 0.2 を主として表-2のように定めた。表中の Q11あるいは Q21が現状の 60キロ級 Q T 鋼に近い機械的性質を持つものである。鋼材記号の最初の Q、L は、それぞれ Q T 鋼、L Y 鋼を示し、H については、その σ_y は Q T 鋼のそれと同じに高めの降伏点を有し、 σ_u も約 690N/mm^2 と高目の引張強度を持つ鋼材を意味している。次の Y、1 および 2 は ε_{st} がそれぞれ ε_y 、 0.01 および 0.02 であることを意味し、最後の 1 及び 2 は ε_u が 0.1 および 0.2 であることを示している。なお典型的な HY1、Q21、L12 の応力-ひずみ曲線を図-3に示す。この図は真応力-真ひずみを公称応力-公称ひずみに変換したものである。

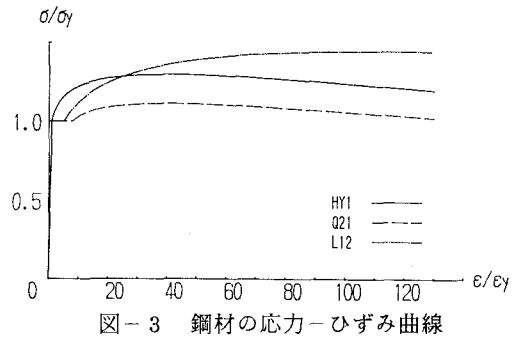


図-3 鋼材の応力-ひずみ曲線

4. 数値計算結果とその考察

これまでの研究結果¹⁶⁾¹⁷⁾より限界状態設計法に向けての土木構造物に適した高張力鋼の一方向として、「鋼材の機械的性質のうち降伏点は現状の Q T 鋼のそれより下げずに（どちらかという若干上げる方向）引張強度をむしろ Q T 鋼などより上げて、その結果として YR を小さくするという方向」と、やはり「降伏点は下げずに、しかも ε_u を大きくするという方向」が考えられた。そこで、ここでは YR が 60キロ級 Q T 鋼（Q シリーズ）と 60キロ級 L Y 鋼（L シリーズ）のほぼ中間で、しかも上記の二つの方向をも満足するように H シリーズを計画し、Q シリーズや L シリーズと比較することによって H シリーズのメリット、デメリットについて検討してみることにした（表-2参照）。

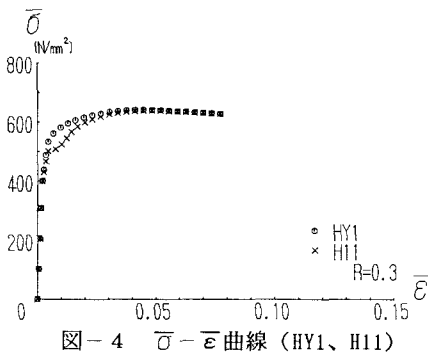


図-4 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (HY1、H11)

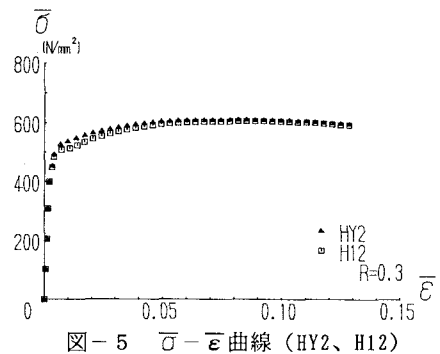


図-5 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (HY2、H12)

(1) $R=0.3$ の場合

(a) H シリーズの極限強度と塑性変形能力について

まず HY1 と H11 および HY2 と H12 の $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 線図を図-4、5 に示す。以下 $\bar{\sigma}_{\max}$ とは公称極限応力であり、

$\bar{\varepsilon}_{\max}$ も公称極限ひずみであって、前章で求めた真応力-対数ひずみを公称値に変換したものである。これらの図より、 $\bar{\sigma}_{\max}$ に関してはHYはH1とほぼ等しいことがわかる。この理由については以下のように考えられる。すなわちHYはいわゆるラウンド型であるのに対し、H1は1%の降伏棚を有しているため、HYの方がH1より急激な硬化率で弾性域よりひずみ硬化域へ入るが間もなく極大点を迎える。いっぽうH1の方は1%の塑性流れの後かなりの硬化率で耐力は上昇するが、これもまもなく極限強度に達するので両者の $\bar{\sigma}_{\max}$ はほぼ等しくなると考えられる。いっぽう前述の理由により、 $\bar{\varepsilon}_{\max}$ についてもHYはH1とほとんど同じで、ダクティリティの点ではひずみ硬化率や降伏棚の有無によって、ほとんど影響を受けないことがわかる。また図-6に HY1~H12 の4ケースの $\bar{\sigma}/\sigma_y - (W_0+W)/t$ 線図をまとめて示す。ここで t は板厚であり、 W は面外たわみである。この図より極限強度における面外たわみ量についても、HYはH1とほぼ同一の値を示すことがわかる。なおこの点についてはタフネス（靱性でここでは吸収エネルギーを意味し、 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線の極大値までの面積）より検討した結果でも、HY≒H1であることが確かめられている（表-3参照）。次に、HY1とHY2、H11とH12の $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 線図を図-7、8に示す。これらの図より $\bar{\sigma}_{\max}$ に関しては $\varepsilon_u=0.1$ の方が0.2のものよりかなり大きい、このことについては $\varepsilon_u=0.1$ のものは0.2のものよりひずみ硬化率が大きいためであると考えられる。反面 $\bar{\varepsilon}_{\max}$ に関しては $\varepsilon_u=0.2$ の方が0.1より遙かに大きい、これは前述のごとく $\varepsilon_u=0.1$ の方が0.2のものより硬化率が大きい、まもなく極大点を迎えるためであると考えられる。なおこのこと

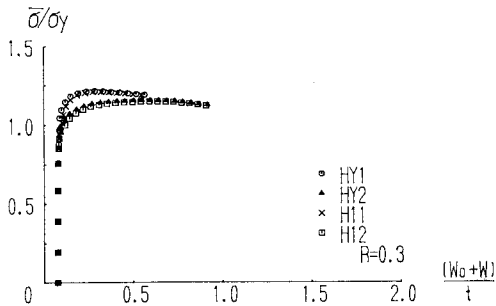


図-6 $\bar{\sigma}/\sigma_y - (W_0+W)/t$ 曲線

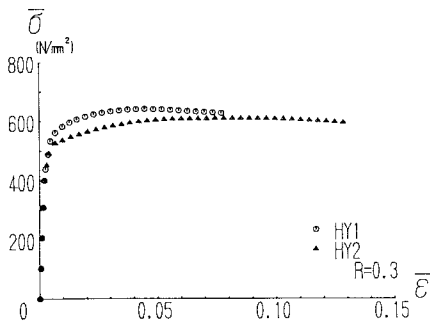


図-7 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (HY1、HY2)

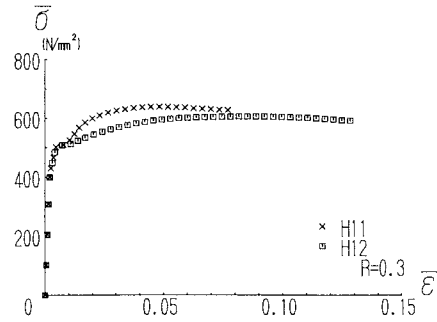


図-8 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (H11、H12)

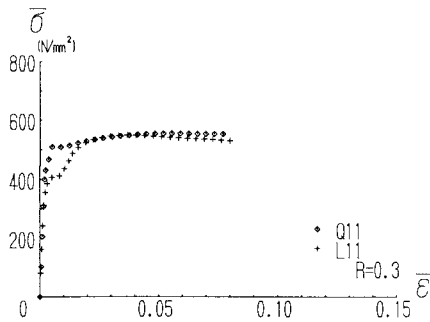


図-9 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (Q11、L11)

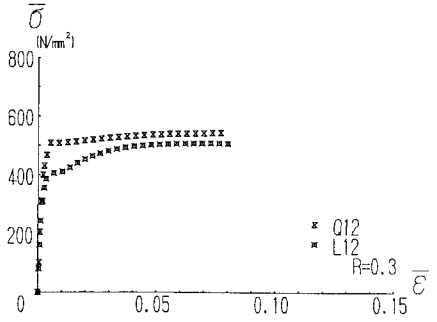


図-10 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (Q12、L12)

は図-6の極限強度時の面外たわみからも言えることであり、 $\varepsilon_u=0.2$ の方が0.1より圧倒的に大きいことがわかる。さらに表-3の吸収エネルギーにおいても $\bar{\varepsilon}_{\max}$ と同様の傾向が認められる。

(b) QシリーズとLシリーズの極限強度と塑性変形能力について

Q11とL11、Q12とL12の $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線を図-9と10に示す。これらの図より、 $\bar{\sigma}_{\max}$ についてはQシリーズの方がLシリーズより高いことがわかる。この理由は降伏点の差によるものであると考えられる。Lシリーズでは明確な塑性流れがあった後、YRが小さいので耐力は顕著な上昇を示すが、やがて極限強度に達する。いっぽうQシリーズでも塑性流れらしきものがあった後、強度は徐々にではあるが上昇していくので結局Qの方がLより若干 $\bar{\sigma}_{\max}$ が大きくなる。反面 $\bar{\varepsilon}_{\max}$ に関しては上述の理由によりLの方がQよりも小さくなっている。このことは図-11の極限強度時の面外変形量についても、また表-3の吸収エネルギーについても同様の傾向がさらに顕著に認められる。次に図-12、13にQ11とQ12、L11とL12の $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 線図を示す。これらの図より、 $\bar{\sigma}_{\max}$ に関しては11の方が12より大きい、この理由はHY1とHY2の場合と同様であると考えられる。ただし11の方は間もなく極限強度を迎えるのに対し、12の方は徐々にしか耐力が上昇しないので、 $\bar{\varepsilon}_{\max}$ の点では12の方が11より遙かに大きくなっている。図-11の $\bar{\sigma}/\sigma_y-(W_0+W)/t$ 曲線での極限強度時の面外たわみの値についても、また表-3の吸収エネルギーについても $\bar{\varepsilon}_{\max}$ と同じ傾向を示すことがわかる。

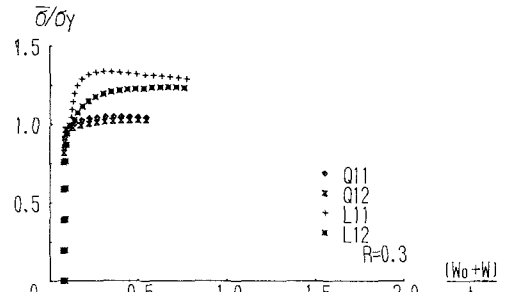


図-11 $\bar{\sigma}/\sigma_y-(W_0+W)/t$ 曲線

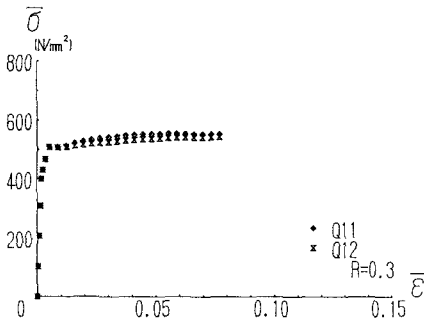


図-12 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (Q11、Q12)

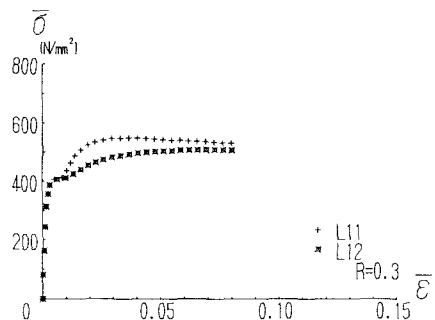


図-13 $\bar{\sigma}-\bar{\varepsilon}$ 曲線 (L11、L12)

表-3 極限強度と塑性変形能力 (R=0.3)

鋼材	$\bar{\sigma}_{\max}$ (N/mm ²)	$\bar{\sigma}_{\max}/\sigma_y$	$\frac{W_0+W_{\max}}{t}$	吸収エネルギー (N/mm ²)	$\bar{\varepsilon}_{\max}/\varepsilon_y$	$\bar{\varepsilon}_{\max}$
HY1	642.19	1.12	0.30	27.64	18.2	0.047
HY2	611.23	1.16	0.61	49.69	33.6	0.086
H11	639.65	1.21	0.31	28.52	19.2	0.049
H12	607.40	1.15	0.61	49.20	33.8	0.087
Q11	554.78	1.05	0.40	30.97	23.0	0.059
Q12	545.86	1.03	0.69	50.37	37.4	0.096
Q21	561.74	1.06	0.45	31.75	23.4	0.060
L11	549.39	1.33	0.34	18.23	19.0	0.038
L12	508.62	1.24	0.71	35.08	37.4	0.075

(c) R=0.3での総括

表-3にR=0.3の結果をまとめて示す。なおこの表よりQ21の極限強度と塑性変形能力については、基本的にQ11のそれらとほとんど変わらないとしてもよい結果が得られている。以下に表-2に示す機械的性質の範囲内ではあるが、R=0.3の場合について総合的に評価してみる。

先ずYR=0.77のHシリーズでは $\bar{\sigma}_{max}$ を大きくするためには、 ϵ_{st} よりも ϵ_u が効きそうで、 ϵ_u が小さい方がよいようであるが、ダクティリティやタフネスといった塑性変形能力についても、 ϵ_{st} より ϵ_u が効きそうで、この場合は ϵ_u を大きくする方がよい。いっぽうYR=0.9のQシリーズとYR=0.7のLシリーズについての比較では、大きな $\bar{\sigma}_{max}$ を必要とするときは、YRが大きく、しかも ϵ_{st} も大きい方がよいようであるが、 ϵ_u は小さい方がよいようである。また塑性変形能力を大きくするためには、YRを大きくししかも ϵ_u も大きい方がよいと言うことがわかる。

さらに現状の60キロ級QT鋼の性質に近いQ11とQ21を基準として、極限強度のみならずダクティリティやタフネスといった塑性変形能力をも含めて総合的に評価すると、Hシリーズ特にHY2とH12が総ての面でQ11やQ21を凌駕しており、「 σ_y は現状のQT鋼より下げずに、 σ_u をむしろQT鋼より上げて、その結果としてYRを現状よりも小さくする」あるいは「 σ_y は下げずに、しかも ϵ_u を大きくする」という、当初より抱いていた考え方の妥当性が検証されたことになる。

(2) R=0.5の場合

R=0.3で各鋼材において $\bar{\epsilon}_{max}$ に対する傾向と面外たわみおよび吸収エネルギーに対する傾向が、ほぼ同じであるということがR=0.5の場合にも言える(表-4参照)ので、ここでは延性や靱性については $\bar{\epsilon}_{max}$ について述べるにとどめる。表-4にR=0.5の結果をまとめて示す。なお表-4の $\bar{\sigma}_{max}/\sigma_y$ で1を切っているものについて、それぞれの座屈波の最大変位地点の断面でみて、一部またはかなりの要素が降伏しているし、HY1とL11ではかなりの要素がひずみ硬化していることを確かめた上で、以下の考察を行っている。

表-4 極限強度と塑性変形能力 (R=0.5)

鋼材	$\bar{\sigma}_{max}$ (N/mm ²)	$\bar{\sigma}_{max}/\sigma_y$	$\frac{W_0+W_{max}}{t}$	吸収エネルギー (N/mm ²)	$\bar{\epsilon}_{max}/\epsilon_y$	$\bar{\epsilon}_{max}$
HY1	559.19	1.06	0.29	4.19	3.6	0.009
HY2	520.77	0.98	0.24	2.67	2.6	0.007
H11	523.91	0.99	0.43	6.88	5.8	0.015
H12	506.76	0.96	0.22	2.11	2.2	0.006
Q11	506.76	0.96	0.21	1.84	2.0	0.005
Q12	506.66	0.96	0.21	1.84	2.0	0.005
Q21	506.46	0.92	0.21	1.84	2.0	0.005
L11	419.83	1.02	0.61	6.15	8.2	0.016
L12	390.63	0.95	0.23	1.11	2.0	0.004

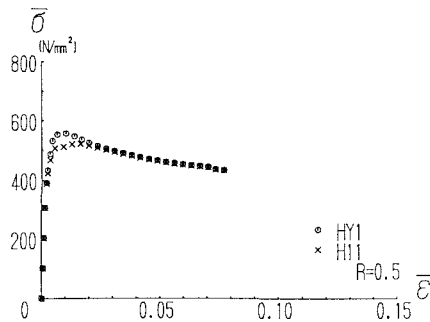


図-14 $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 曲線 (HY1、H11)

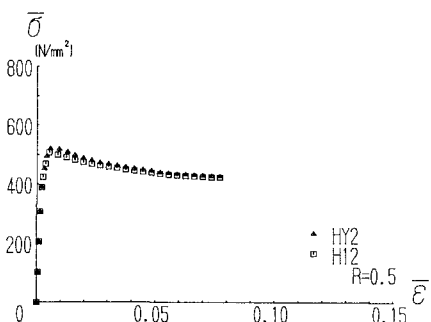
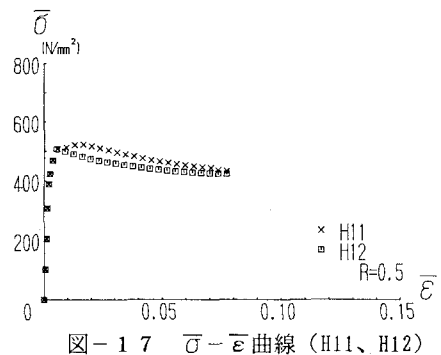
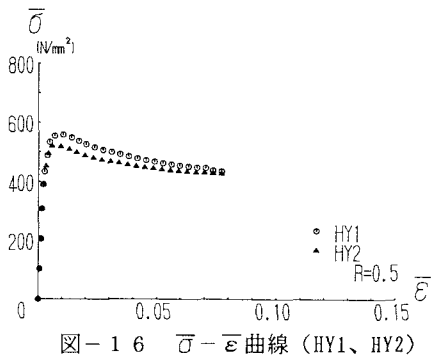


図-15 $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 曲線 (HY2、H12)

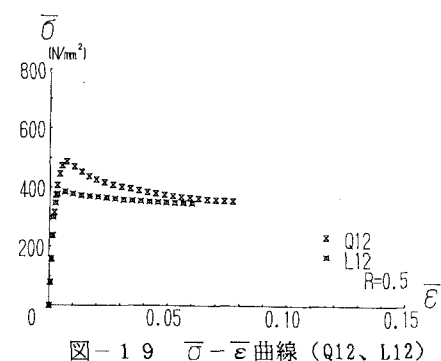
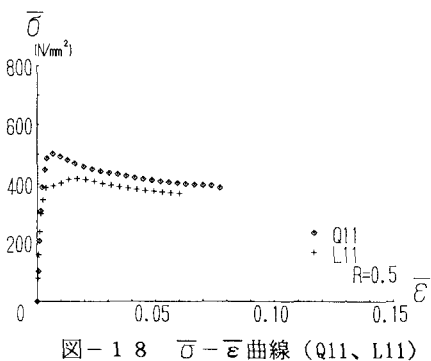


(a) Hシリーズの極限強度と塑性変形能力について

HY1とH11、HY2とH12の $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 線図を図-14と15に示す。図-14より $\bar{\sigma}_{\max}$ に関してはHY1がH11より大きく、 $\bar{\epsilon}_{\max}$ は逆にH11がHY1より大きくなっているが、このことについてはHY1は断面のかんりの部分がひずみ硬化域へ入っている上にラウンド型であるので、塑性流れなしに直接ひずみ硬化域へ入り間もなく極限強度を迎えるのに対し、H11の方は断面のかんりの部分が降伏しているため、若干の塑性流れをみせた後強度が低下する。そのために $\bar{\sigma}_{\max}$ はHY1の方がH11より若干大きく、 $\bar{\epsilon}_{\max}$ の方はH11の方がHY1よりかなり大きくなったと考えられる。いっぽう図-15より $\bar{\sigma}_{\max}$ に関してはHY2の方がH12よりやや大きく、 $\bar{\epsilon}_{\max}$ はほとんど変わらない結果となっているが、これは降伏域の大きさに起因していると考えたと説明がつく。次に図-16、17にHY1とHY2およびH11とH12の $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 線図を示す。これらの図で $\bar{\sigma}_{\max}$ および $\bar{\epsilon}_{\max}$ の両者とも、 $\epsilon_u=0.1$ の方が0.2のものより大きい値を示しているが、このことについては図-16ではHY1はかんりの部分がひずみ硬化域へ入っているのに対し、HY2はひずみ硬化していないことによると考えられる。いっぽう、図-17では降伏域の差によって、H11は若干の塑性流れを示すのに対し、H12の方は断面の一部が降伏してすぐに強度が低下するためであると考えられる。

(b) QシリーズとLシリーズの極限強度と塑性変形能力について

図-18、19にQ11とL11、Q12とL12の $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 線図を示す。これらの図で $\bar{\sigma}_{\max}$ については、Qシリーズの方がLシリーズより大きな値を示しているが、この理由については単純に降伏点の差によるものと考えられる。いっぽう $\bar{\epsilon}_{\max}$ に関してはL11ではLシリーズの方は断面のかんりの部分がひずみ硬化域へ入っているのに対し、Qシリーズの方はせいぜい断面の一部が降伏している程度なので、Lの方が耐力も上昇するし、 $\bar{\epsilon}_{\max}$ も大きくなったと考えられる。また12についてはQシリーズの $\bar{\epsilon}_{\max}$ 値がLのそれとほとんど変わらないが、これは両者とも断面の一部が降伏して間もなく強度が低下していくためであろう。次に図-20、21にQ11とQ12、L11とL12の $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 線図を示す。これらの図よりQシリーズでは11と12のいずれも、断面の



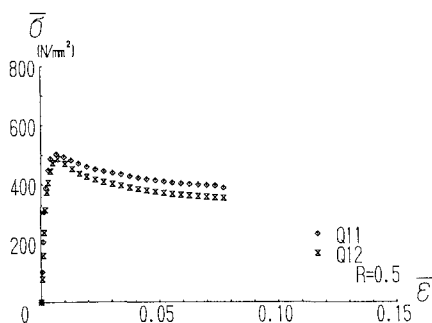


図-20 $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 曲線 (Q11、Q12)

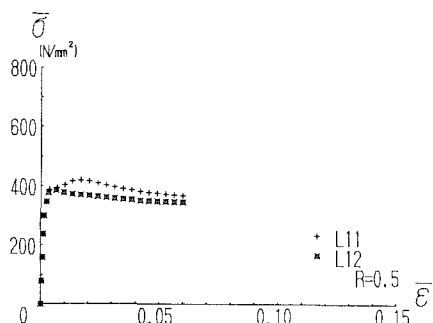


図-21 $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ 曲線 (L11、L12)

一部が降伏してすぐ極限強度を迎えるために、 $\bar{\sigma}_{\max}$ はもちろんのこと $\bar{\epsilon}_{\max}$ もほぼ同一の値を示していると考えられる。いっぽう L シリーズでは 11 についてはかなりの部分がひずみ硬化領域へ入っているの、耐力の方は徐々に上昇し極限強度に達するのに対し、12 の方は断面の一部が降伏してすぐ強度低下が始まるので、11 の方が 12 より $\bar{\sigma}_{\max}$ も $\bar{\epsilon}_{\max}$ も大きくなったと考えられる。

(c) $R=0.5$ の総括

$R=0.3$ の場合と同様、表-4 での Q21 の各値は、Q11 のそれらとほぼ同一の値を示すことがわかる。以下に表-2 に示す機械的性質の範囲内ではあるが、 $R=0.5$ の場合について総合的に評価してみる。

先ず $YR=0.77$ の H シリーズでは $\bar{\sigma}_{\max}$ を大きくするには、 ϵ_{st} も ϵ_u も小さい方がよい。しかしダクティリティやタフネスといった塑性変形能力を大きくするには、 ϵ_{st} が大きく、しかも ϵ_u が小さい方がよい。いっぽう $YR=0.9$ の Q シリーズと 0.7 の L シリーズについての比較より、極限強度に関しては YR が支配要因であり、これを大きくすると極限強度も大きくなる。ところで塑性変形能力を大きくするには、 YR が小で ϵ_u も小さい方がよい。

さらに現状の 60 キロ級 Q T 鋼の性質に近い Q11 と Q21 を基準として、極限強度のみならず塑性変形能力を含めて総合的に評価すると、H シリーズなかんずく HY1 と H11 が総ての面で Q11 や Q21 より勝っているということから、 $R=0.3$ の場合と同様、当初より抱いていた考え方「 σ_y は現状の Q T 鋼より下げずに、 σ_u をむしろ Q T 鋼より上げて、その結果として YR を現状よりも小さくする」の妥当性が、基本的にこの場合も証明されたことになる。

5. 結論

本研究の結果として、以下のことが言える。

(1) 鋼板構造の基本構成要素である圧縮板 (570N/mm^2 高張力鋼) を対象として、極限強度のみならず変形性能と鋼材特性の関連性を論理的に明らかにすることができた。

(2) 現状の 60 キロ級 Q T 鋼に近い Q11 と Q21 を基準として、極限強度のみならず変形性能をも評価基準として評価した結果、 $R=0.3$ では HY2 と H12 が、また $R=0.5$ では HY1 と H11 がすべての点で優れているということが明らかになった。

(3) 土木構造物の限界状態設計法に適した 60 キロ級高張力鋼 (570N/mm^2) として、当初より抱いていた、「 σ_y は現状の Q T 鋼より下げずに、 σ_u をむしろ Q T 鋼より上げて、その結果として YR を小さくする」または「 σ_y は下げずに、しかも ϵ_u を大きくする」という考え方が、論理的に妥当であるということが証明された。

なお残留変形の観点よりすると変形性能が余り大きすぎても問題なので、この点については別途検討が必要であろう。

本研究の解析の遂行には、当時岐阜大学大学院学生梅村哲男君（現在 J R 東海）の、また論文作成には岐阜大学大学院学生の後藤茂之君の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

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，321号，pp.1-7，1986年。
- 2) 加藤 勉：建築用鋼材の降伏比について，鉄と鋼，第74年，第6号，pp.11~21，1988年。
- 3) 高張力鋼ワーキンググループ：建築構造用60キロ高張力鋼の機械的性質の目標値について，日本鉄鋼協会構造用鋼材の機械的性質に関する調査研究委員会資料，pp.1-96，1988年3月。
- 4) 加藤 勉：構造用鋼の許容応力度，カラム，pp.19-22，1965年4月。
- 5) 加藤 勉・青木博文：応力集中を有する変断面材の伸び能力と降伏比，日本建築学会論文報告集，第159号，pp.25-30，1969年5月。
- 6) Kato, B. and Okumura, T. : Structural Behaviour Including Hybrid Construction, Proceedings of 10th Congress of IABSE, 1976.
- 7) 青木博文・加藤 勉・難波恒夫・佐藤亘宏：変断面鋼板の変形能力と素材の力学的特性，日本建築学会論文報告集，第320号，PP.36-42，1982年10月。
- 8) 佐藤邦彦・豊田政男・塚本光夫・渡辺 之・田川寿俊・津山青史：鋼の降伏比が構造性能に及ぼす影響，溶接学会論文集，第3巻，第3号，PP.153-159，1985年。
- 9) 桑村 仁：降伏比の異なる高張力鋼を用いたH形断面短柱の終局強度と変形能力について，構造工学論文集，Vol.34B, pp.75-84，1988年3月。
- 10) 桑村 仁・佐々木道夫：部材の降伏耐力のばらつきが多層剛節骨組の崩壊メカニズムに与える影響について，構造工学論文集，Vol.34B, pp.23-33，1988年3月。
- 11) 豊田政男・小井 衛・萩原行人・瀬戸厚司：骨組溶接構造体の変形能に及ぼす鋼材変形特性の影響，溶接学会論文集，第8巻，第1号，pp.112-119，1990年。
- 12) 田中明広・岩崎宣博・上田正博・伊藤正彦・上村宗倫・田川寿俊：鋼構造用鋼材，日本鋼管技報，No.109，pp.2~14，1985年。
- 13) 大橋 守・望月晴雄・山口種実・萩原行人・桑村 仁・岡村義弘・富田幸男・小松伸行・船津裕二：建築用高性能厚板の開発，製鉄研究，第334号，pp.33~42，1988年。
- 14) 大西一志・鈴木秀一・染谷 良・内村弘己・鎌田芳彦：高層ビル用低降伏比 60kgf/mm²高張力鋼の開発，住友金属，Vol 40, No.3, pp.33-42，1988年7月。
- 15) 大沢紘一：鉄鋼業における製品開発 - 高級化への軌跡 - ，高張力鋼，鉄鋼界，pp.10-17，1989年2月。
- 16) 森脇良一：降伏比の異なる60キロ級高張力鋼による溶接組立梁の極限強度と変形性能について，構造工学論文集，Vol 37A, pp.155~166，1991年3月。
- 17) 森脇良一・林 建治・後藤茂之：溶接組立梁の局部座屈と塑性変形能力について，構造工学論文集，Vol 38A, pp.243~252，1992年3月。
- 18) 奈良 敬・出口恭司・小松定夫：ひずみ硬化を考慮した圧縮板の極限強度に関する研究，構造工学論文集，Vol 33A, pp.141~150，1987年3月。

(1992年9月21日受付)