

構造用鋼板の伸び能力について

ON ELONGATION CAPACITY OF STRUCTURAL STEEL PLATES

奥村 敏恵*・堀川 浩甫**
By Toshie Okumura and Kohsuke Horikawa

1. はじめに

金属材料試験法などの規定により通常測定され、報告されている伸びは、特定の引張試験片上の標点間の伸びであって、同一の鋼板から切削した試験片であっても、試験片の形状寸法が異なると全く異なった伸びの値を示し、規格値も試験片の形状ごとに定められているのが現状である(表-1, 図-1)。形状寸法の異なった試験片の伸びの間の定量的な関係を明確に示した研究はまだ少なく^{1)~4)}、そのため異なった形状寸法の試験片による二つの材料の伸び能力を比較することはできない。

また高降伏点高張力鋼の伸び能力は従来から用いられている軟鋼にくらべて幾分劣る傾向にあり、加えて高降伏点高張力鋼は、その特徴として、高いじん性を要求されているので、局部的なくびれが大きい。このことは測定された試験片の標点間の伸びのうちの、くびれを生ずる以前に生じている試験片全体に一樣な伸び(一樣伸び)とくびれにともなって生ずる局所的な伸び(局部伸び)の間のバランスを変えており、一樣伸びの量はさらに小さくなっている。したがって従来規格値の吟味のために慣用されている試験片の標点間の伸び量で、その伸び特性を一義的に論ずることは不適當であると考えられる。

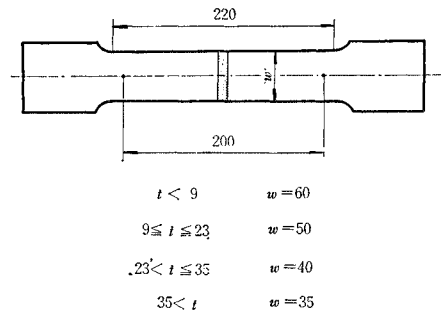
表-1 JIS 伸び規格

鋼種	板厚	伸び	試験片
SM 41	$t \leq 5 \text{ mm}$	23%	JIS 5号
	$5 < t \leq 16$	19	JIS 1号
	$16 < t$	22	JIS 1号
	$40 < t$	24	JIS 4号
SM 50	$t \leq 5$	22	JIS 5号
	$5 < t \leq 16$	18	JIS 1号
	$16 < t$	21	JIS 1号
	$40 < t$	23	JIS 4号
SM 50 Y SM 53	$t \leq 5$	19	JIS 5号
	$5 < t \leq 16$	16	JIS 1号
	$16 < t$	19	JIS 1号
	$40 < t$	21	JIS 4号
SM 58	$6 \leq t \leq 16$	19	JIS 5号
	$16 < t$	26	JIS 5号
	$20 < t$	20	JIS 4号

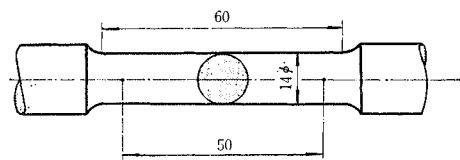
* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京大学講師 同

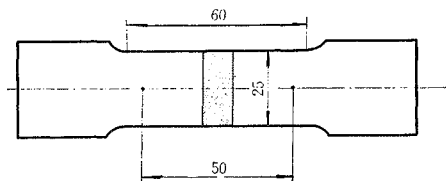
図-1 JIS 引張試験片
JIS 1号



JIS 4号



JIS 5号



この報告ではもっと適切に伸びの特性を把握するために、伸びの特性を表現する要素として、一樣伸び、局部伸び、および“無限小標点距離に対する伸び率”に換算される断面の絞り率に着目して、これらの特性を検討することにした。

2. 各種伸びの定義と測定法

いま、ある試験片(供試材は付表の No. 1)に引張力をかけて破断せしめ、伸びの分布を観察すると、伸びは破断箇所近傍のくびれた部分に集中する局部伸びとその両側の平行部にわたってほぼ一樣に分布する一樣伸びとからなることがわかる。図-2 はあらかじめ 5 mm 間隔にケ書いておいて、切断後、これを測定し、試験片各部

付表 供試鋼材の特性値

No.	鋼種	板厚 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	一様伸び (%)	局部伸び (14φ) (mm)	絞り率 (%)	νE_0 (kg-m)	備考
1	非調質 60 キロ鋼	18	47.4	62.6	16.3	9.2	69	20.2	焼ならし材
2	調質 60 キロ鋼	19	60.7	66.8	8.3	11.9	73	7.8	焼入れ焼戻し材

における伸びの分布を調べた結果である。一様伸びは最大荷重に達するまでに生ずる伸びであり、局部伸びは試験片にくびれを生じ、荷重が低下している不安定な状態で生ずる伸びである注)。

破断箇所を含む任意の標点間の伸びを考えると、全伸び δ_T 、一様伸び δ_u 、および局部伸び δ_L の間には

$$\delta_T = \delta_u + \delta_L \quad \dots\dots\dots (1)$$

の関係があり、この両辺を標点距離 l で割ると伸び率について

$$\epsilon_T = \epsilon_u + \frac{\delta_L}{l} \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係がなりたつ。これより、試験片の断面形状が一定であれば全伸び ϵ_T は標点距離の逆数 $1/l$ と直線関係にあり、 $1/l=0$ 、すなわち、 $l=\infty$ とすれば $\epsilon_T = \epsilon_u$ 、全伸びと一様伸びは一致することがわかる。実際、上記試験

注) 一様伸びは最大荷重に達する前に生ずる伸びで、局部伸びは試験片にくびれを生じ、荷重が低下しているときに生ずる伸びであることを、塑性学の本⁹⁾に習って証明する。引張荷重最大の条件は

$$dF = d(A \cdot \sigma) = A \cdot d\sigma + \sigma \cdot dA = 0 \quad \dots\dots\dots (A-1)$$

弾性ひずみを無視した近似で体積一定とすると

$$d(A \cdot l) = A \cdot dl + l \cdot dA = 0 \quad \dots\dots\dots (A-2)$$

(A-1) (A-2) より

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A} = \frac{dl}{l} = d\epsilon$$

$$\therefore \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \quad \dots\dots\dots (A-3)$$

(A-3) が最大荷重の条件である。

いま、一様な引張応力のもとで一様に伸びている材料のある横断面に、微小な局部伸び $\delta\epsilon$ を生じ、このときの応力の変化が $\delta\sigma$ であったとする。このときの材料の硬化は、 $(d\sigma/d\epsilon)\delta\epsilon$ であるので、

$$\delta\sigma < \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)\delta\epsilon \quad \dots\dots\dots (A-4a)$$

であれば、この断面はこれ以上変形せず、変形は他の部分に生じ、結局、試験片全体にわたって一様伸びとなる。

$$\delta\sigma \geq \left(\frac{d\sigma}{d\epsilon}\right)\delta\epsilon \quad \dots\dots\dots (A-4b)$$

であれば、この局部変形は増大し、くびれとなる。

一方、 $\delta\epsilon$ を生じた断面 (面積 $A+\delta A$) とそれに隣接する断面 (面積 A) のつり合いから

$$(A+\delta A)(\sigma+\delta\sigma) = A \cdot \sigma \quad \dots\dots\dots (A-5)$$

体積一定から

$$(A+\delta A)(1+\delta\epsilon) = A \cdot 1 \quad \dots\dots\dots (A-6)$$

(A-5)、(A-6) から

$$\sigma = \delta\sigma = \sigma(1 \cdot \delta\epsilon)$$

$$\therefore \delta\sigma = \sigma\delta\epsilon \quad \dots\dots\dots (A-7)$$

これを (A-4) に代入すると

$$\sigma \geq \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad \dots\dots\dots (A-8)$$

(A-3) と (A-8) を比べると、くびれの開始の条件と、最大荷重の条件が等しく、くびれの開始の時期が、最大荷重のときであることが証明できた。

図-2 伸びの分布

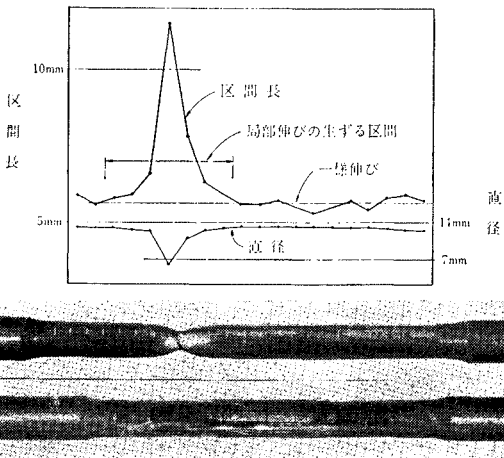
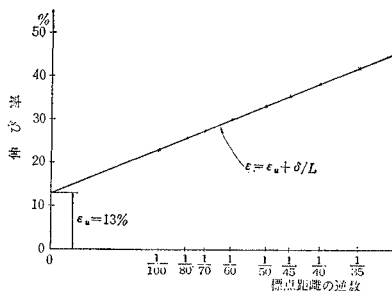


図-3 $\epsilon-1/L$ 直線



片上にとった破断箇所を含むいくつかの標点距離 l について伸び率 ϵ を測定し、これを $1/l$ に対してプロットすれば、図-3 のごとく一直線上にならび、この直線が $1/l=0$ の軸を切る切片を読むことによって一様伸び ϵ_u の値を知ることができる。全伸び δ_T から一様伸び $\delta_u = \epsilon_u \cdot l$ を差し引くことによって局部伸び δ_L は容易に求められる。

一方試験前のある区間の長さを l_0 、断面積を A_0 、破断後のそれをそれぞれ l 、 A とし、体積一定より $l_0 \cdot A_0 = l \cdot A$ であることを考慮すれば、この区間の伸びは、

$$\epsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{A_0-A}{A} = \frac{A_0}{A} - 1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

一方断面減少率は、

$$q = \frac{A_0-A}{A_0} = 1 - \frac{A}{A_0} \quad \dots\dots\dots (4)$$

であるから

$$\epsilon = \frac{1}{1-q} - 1 = \frac{q}{1-q} \quad \dots\dots\dots (5)$$

断面として破断箇所の最小断面を考えると、ここに定義される伸びは破断箇所の最大の伸びを表わしており、

“無限小標点距離に対する伸び”と呼ばれているものになる。このように、破断箇所の断面減少率(絞り率)は伸びと直接に結びついており伸び(延性)の性質の表現の一つであると考えることができ、以下では伸びの一種として取扱う。

3. 試験片の形状が各種伸び能力におよぼす影響

供試材 No. 2 の同一鋼板から表-2 に記した形状寸法の試験片を作成し、前節の手法によって各種の伸び能力を測定したところ、同表に示すような結果を得た。なお広幅試験片は黒皮つきのままであるが、その他は切削除去してある。最遠標点距離が 50 mm のものおよび広幅試験片においては、くびれが試験片の平行部の全域にわたったので一様伸びとして、これらを除いたものの平均値を採用して局部伸びを計算したところきわめて合理的な値となった。

これよりつぎのことが知られる。

- (1) 断面形状が一定であれば、一様伸び、局部伸び、絞り率とも最遠標点距離(平行部長さ)によらない。
- (2) 一様伸びは断面の形状寸法にもよらない。
- (3) 局部伸びは断面積の平方根と直線関係(ほぼ比例関係)にある(図-4)。

表-2 伸びにおよぼす形状の影響

最遠標点距離 (mm)	断面 (mm)	\sqrt{A} (mm ²)	t/b	一様伸び (%)	局部伸び (mm)	絞り率 (%)
50	φ14	12.4	—	14.0 (8.3)	9.3 (12.2)	72.8
100	"	"	—	8.3	11.9	72.6
200	"	"	—	7.7	12.4	73.3
"	12×12	12.0	1.00	9.2	10.9	69.8
"	9×25	15.0	0.36	9.7	12.2	59.5
"	9×50	21.2	0.18	8.0	17.4	55.4
"	17.4×25	20.9	0.70	8.3	17.4	65.8
"	17.4×50	29.5	0.35	8.0	22.0	57.8
400	"	"	"	7.7	21.4	59.9
500	19×400	87.2	0.05	11.7 (8.3)	39.3 (56.2)	51.5

- 1. 広幅は2個、その他は3個の平均
- 2. () 内は修正値

図-4 局部伸びと \sqrt{A} の関係

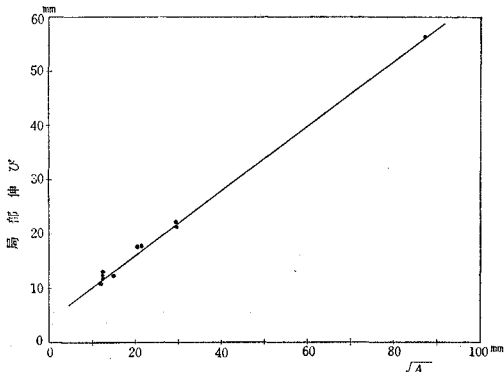
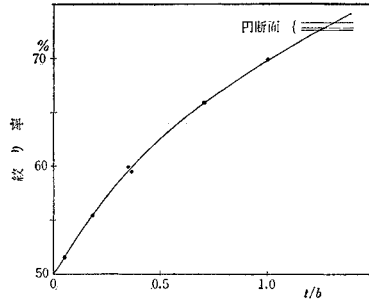


図-5 絞り率と t/b の関係



(4) 絞り率は断面の形状比(板厚と板幅の比)とある関数関係にある(図-5)。

以上より、同一鋼板について断面形状の異なった2個以上の

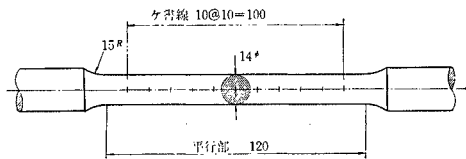
試験片の一樣伸び、局部伸び、および絞り率を求めるならば図-4、図-5と類似の考察により任意の断面形状の試験片の局部伸びおよび絞り率を推定することができるから、任意の標点距離に対する伸びも計算により求めることができる。

4. 標準試験片の設定

前節で述べたように局部伸びと絞り率とは試験片の断面形状、寸法に依存しているので、鋼材間の比較を論ずるには標準試験片を用いるのが便利である。

断面形状としては、絞り率の鋼材間の差の大きな円断面を選ぶこととし(板状断面で $t/l \rightarrow 0$ とすれば鋼材によらず絞り率は約50%となる) JIS 4号試験片を考へてφ14 mmとした。くびれが円断面の場合、直径の2倍ぐらいの長さにならなれば、これを含む標点距離を何点か採るためには、最遠標点距離がある程度必要なことから最遠標点距離を100 mmとした。このような総合判断のもとで図-6に示す“長4号引張試験片”を標準試験片として以下の考察を行なった。

図-6 長4号引張試験片



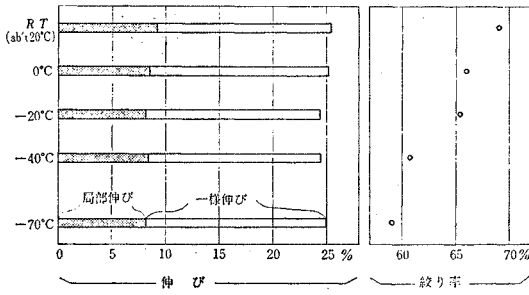
全長 約350mm
つかみ部の径 16~20mm

5. 温度が伸び能力に与える影響

温度によって各種伸び能力がどのような影響を受けるかを見るために、No. 1 の供試鋼板から作成した試験片を常温(約20°C)のほか、ドライアイスとアルコールの冷却槽に浸して、0°C、-20°C、-40°C および -70°C に冷却して引張試験片を行なった。その結果のうちの伸び能力の変化する様子を図-7に示す。

これによれば、+20°C~-70°Cの範囲では、一様伸びは温度の影響を受けていないが、局部伸びと絞り率は温度が低下するにしたがって減少している。この様子はシ

図-7 伸び能力の温度変化



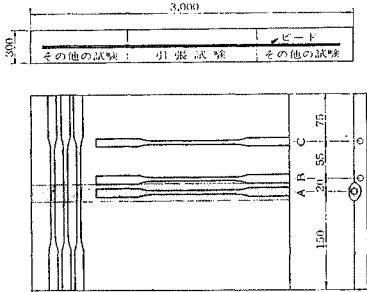
シャルピー衝撃試験の遷移曲線とよく似ており、これからも局部伸び、絞り率およびじん性の結びつきが知られ、一方、一様伸びと局部伸び、絞り率が本質的に別個のものであることを示している。

6. 溶接が伸び能力に与える影響

溶接部の伸び能力はかなり劣化している恐れがあるので、供試材 No.1 で図-8 のごとき試験体を作り、同図に示す各部より引張試験片を採取して伸び能力を調査した。ビードの溶接条件は表-3 のとおりである。試験片Aは主として溶着金属のBは熱影響部の性質を表わしていると考えられる。

試験結果を表-4 に記すが、溶接部の伸び能力の劣化

図-8 溶接部伸び試験片



は明瞭であり溶接線に直角方向の試験片における伸びの分布(図-9)もそれを裏付けている。

これらの性質をより明確にするため、溶接部

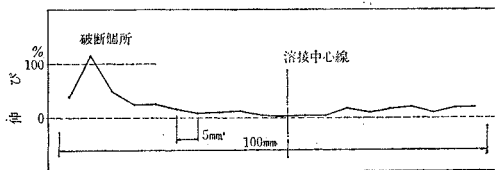
表-3 溶接条件

電 流	700 A
電 圧	35 V
速 度	35 cm/min

表-4 溶接部の伸び能力

位 置	一様伸び	局部伸び	絞 り
A	13.4%	7.7mm	53%
B	15.3	10.2	70
C	16.3	9.2	69

図-9 溶接直角方向の伸び分布



のじん性の変化などの関連について、さらに研究を推進する必要があると感ずる。

7. 各種構造用鋼板の伸び能力の現況

筆者がここ 2~3 年間に取扱った鋼材の伸び能力のデータを図示すると図-10 のようになる。

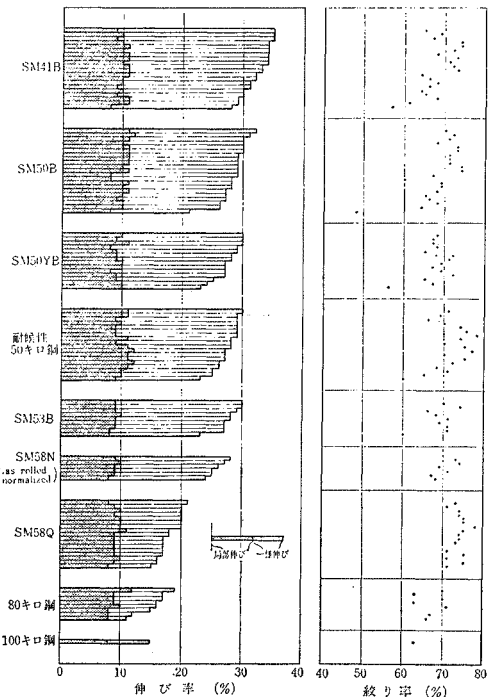
これによると局部伸びは鋼種を問わずほぼ一定であり、伸び能力の相違は一様伸びの差によるものであることが知られる。一様伸びは一般に強度が上昇するにつれて減少する傾向にあるがとくにづぎのことが目につく。まず 50 キロ級の SM 50, SM 50 Y, SM 50 耐熱性鋼および SM 53 の伸び能力は、ほとんど同じである。調質鋼の一様伸びは非調質鋼のそれとの間には大きな差があり、SM 58 であっても調質材の一様伸びは非調質材 (asrolled のもの, normalize したもの) のその 1/2 ないし 2/3 になっている。これは、調質高張力鋼は非調質鋼とくらべたとき、単に強度が上昇しているばかりでなく、本質的に異なった、何ものかがあることを示唆している。また調質 80 キロ鋼において、一様伸びが 3% 前後のものも見られ、これについては何らかの不測な原因による特異なものとも考えられるが、今後において問題となる可能性があると考えられる。

なお、構造用鋼板だけでなく、高力ボルトの材料 ($\sigma_y = 90 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 100 \text{ kg/mm}^2$ または $\sigma_y = 110 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B = 120 \text{ kg/mm}^2$ 程度の低炭素鋼) の伸び能力もほぼこの節で述べた性質の延長上にあるように見受けられた。

8. 伸び能力に影響をおよぼす要素

先に試験片の形状、温度、溶接などが伸び能力に影響を与えることは述べたが、鋼板固有の性質としての伸び能力に影響を及ぼす材料の機械的性質を検討するため

図-10 伸び能力の現況



- ① 伸びと絞り率
- ② 伸び、絞り率と衝撃吸収エネルギー
- ③ 伸び、絞り率と降伏点
- ④ 伸び、絞り率と引張強さ
- ⑤ 伸び、絞り率と降伏比

の相関性を調べた。

これによれば一様伸びと絞り率の間には相関性はなく、局部伸びと絞り率の間にはかなり強い相関性が認められた。絞り率が無限小標点距離に対する伸びを表わす指標でもあることを考えると、このことは容易に理解できる。よって以下では局部伸びと絞り率を絞り率で代表させてある。

一様伸びと衝撃吸収エネルギーの間には相関係数がなく、絞り率と常温における衝撃吸収エネルギーの間には密接な関係があることが知られる(図-11)。延性とじん性の区別は詳かでないが、この図によれば絞り率はじん性の一表現と考えられ、絞り率と局部伸びとが同じ性質のものであることを考えると、結局、引張試験において最大荷重に達した後の変形能力がじん性であるということができよう。

降伏点と一様伸びとの間には相関性が見られ(図-12)、絞り率との間には相関性は少ない。図-12においておれ目が見られるが、この点は降伏比が90%を越え、ほぼ飽和したことに対応していると考えられる。一方、

図-11 絞り率と衝撃エネルギーの関係

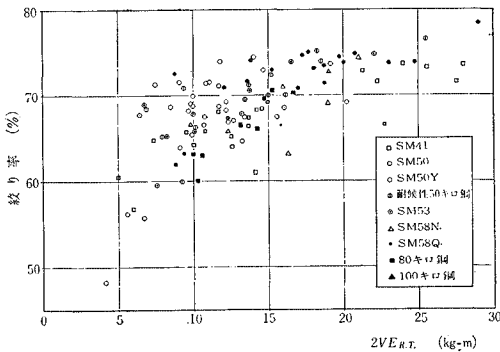
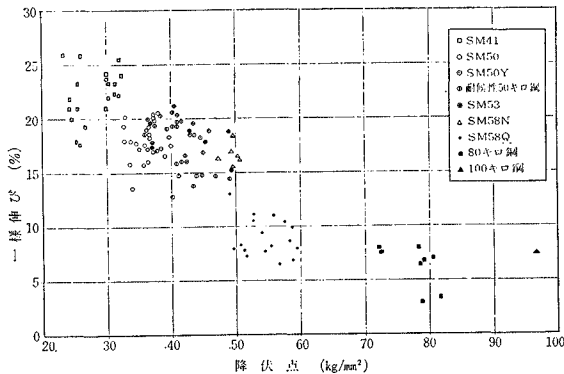


図-12 一様伸びと降伏点の関係



降伏比と、一様伸びの相関図ではおれ目のないほぼ直線上に分布しているが、ばらつきが大きい。これらより一様伸びは降伏比に依存しているほか強度それ自身の大きさも影響しているようである。

9. むすび

伸びの特性を適切に把握するために、伸びの特性を表現する要素として、一様伸び、局部伸び、および“無限小標点距離に対する伸び率”に換算される断面の絞り率に着目して、これらの特性を検討した。

すなわち、まず一様伸び、局部伸びおよび絞り率の定義とその測定法を確立し、同一材料で形状寸法の異なる試験片についての実験によって、形状、寸法による測定値の変化を調べ、ついで同一形状、寸法の試験片により100枚余りの各種鋼板の伸び能力を測定、検討した。

その結果、材料の伸びは最高荷重に達するまでの一様伸びと、最高荷重に達した後のくびれをとまう局部伸びとに分けて考えることが望ましく、前者は、同一材料であれば寸法によらず一定であること、高強度鋼になればなるほど小さな値を示し、特に調質鋼材の一様伸びと非調質鋼材のそれとの間には大きな差がある。後者は同一材料であっても試験片の形状・寸法によって異なるので、他の材料とくらべるには形状、寸法と同じ試験片でなければならぬこと、鋼種が異なっても大きな変動はないが、絞り率や衝撃吸収エネルギーと密接な関係にあり、材料のじん性の一表現であると考えられること、などが知られる。

また低温での試験においては一様伸びは温度の影響を受けないのに対して、局部伸びは低温になれば減少し、その様相が衝撃吸収エネルギー遷移曲線とよく似ていること、溶接部の伸び能力は、一様伸び、局部伸びともに低下することも述べた。

鋼材の伸び能力が、構造物において、いかなる働きをするかについては、材料の延性が必要とされる構造物に、高降伏点高張力鋼を使用する際の一つの問題点と考えられ¹⁾、筆者らも考察を行なったので、別途発表の予定である。

最後に、この研究は日本鉄道建設公団からの受託研究に関連して行なわれたものであり、またこの報告は堀川が東京大学に提出した学位論文の一部を基にしたものであることを付記する。

参考文献

- 1) 木原・藤田：Journal of H.P.I., Vol. 2, 1964
- 2) Fennev, et al. : National Engineering Laboratory Report, No. 87, 1963, England
- 3) Holmberg, et al. : Bulletin RILEM, No. 26, 1965
- 4) 佐藤：日本海事協会誌 第52号, 1958
- 5) たとえば Hill : The Mathematical Theory of Elasticity, Oxford Press, 1950 (鷲津他訳, 培風館 1954) (1967.8.8・受付)