

軟鋼棒の引張における寸法効果 (第2報)

大野 元明*・益富 雅之*・長富 敏明(研究生)**

要 旨

鋼その他金属材料の強度試験を行なうに際しその試験片の大小が機械的性質にいかん影響にするかについては、すでに二、三の実験報告がある。筆者はこれらの結果を確める目的を兼ねて、前報¹⁾では直径19耗の同一丸鋼より任意に削成した相似円形断面試験片および非相似の矩形断面試験片についての寸法効果について検討したが、これに引続いて大型丸鋼より同心的に試験片を採取した円形断面の相似試験片および同一鋼板より作製した矩形断面の相似試験片、断面積の平方根と標点距離の比を一定とする矩形断面試験片について実験を行なった。表面層、材料内部の欠陥に基因すると考えられる引張強さ、降伏点などに生ずる寸法効果は僅少であり、一般的には強度不変と考えると差支えない程度である。寸法効果は主として局部収縮に関連して起こり断面収縮率は試験片の原断面積の大なるものほど低下する。矩形断面試験片では幅/厚さが局部収縮、破断様式に関係してくる。

1. 緒 言

引張試験における引張強さ、降伏点などに影響する寸法効果の主要原因としては前報に記したように表面層、材料内部の欠陥があげられる。寸法効果を精確に実験するためには各試験片の材質、組織を平等にする必要があり、そのため試験片は通常鋼塊をロールして作った直径の大なる丸鋼から同心的に採取する方法がとられる。今回の円形断面試験片はこの方法にしたがって採取した。

寸法効果は円形断面棒に限らず矩形断面棒についても同様に生ずる。前報の非相似矩形断面棒の実験に引続いて相似矩形試験片ならびにアウイン、バルバの法則が成立するといわれる断面積の平方根と標点距離との比を一定とする矩形試験片について実験した。矩形試験片では上記の二種類の試験片をそれぞれ同一鋼板から採取したが厚さ方向の組織は均等と見なして適宜に加工した。

矩形棒では厚さ、厚さ/幅などの寸法が破断直前のネックの方向や破面形状の差異を生ずる。本報ではこれらに関する二、三の実験結果について附記する。

2. 相似円形断面棒

素材は直径150耗のS.F.45丸鋼を用い図2のごとく同心的に試験片材を採取した。成分分析結果は表1の通り

で、その顕微鏡組織を図1に示した。組織は均一と見なされる。試験片寸法は図3のごとき相似形とし直径2〜15耗の9種類各5本ずつとした。図4に写真を掲げた。これらの試験片はすべて最小仕上代を残して機械加工後850°C30分加熱した後炉中徐冷を行い研磨仕上をほどこした。また実験に際しては試験片の平行部を9等分し相似標点を付した。使用試験機は2, 5, 25トンのアムスラー試験機である。

表1 成分分析値

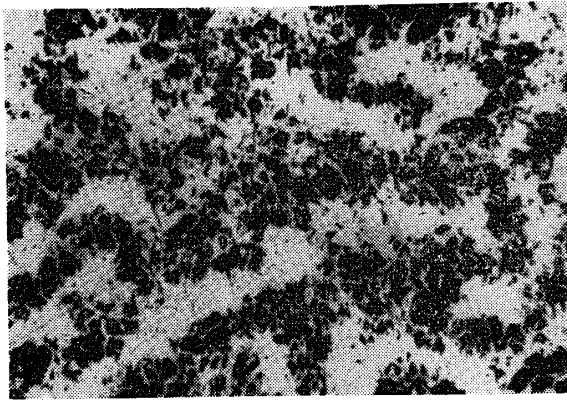
C	S ₂	M _n	S	P
0.27	0.43	0.71	0.016	0.011

表3は試験片の試験前の直径および試験した機械的性質を記入したもので、引張強さ σ_B 、降伏点 σ_S 、伸 ϵ 、断面収縮 ψ を直径の大きさを横軸にとって比較すれば図5および図6のごとくなる。 σ_B 、 σ_S はほとんど不変であるが、 ϵ 、 ψ は直径の増大とともに低下する傾向が現われている。ただし ϵ の方はばらつきが大ではっきりした傾向は現われていない。

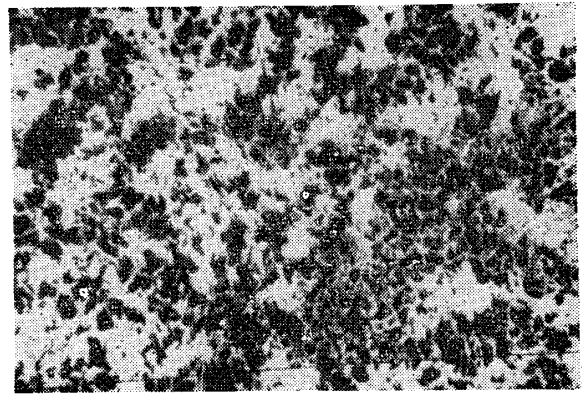
これらの機械的性質を前報の同一丸鋼より各試験片とも中心を含んで加工した相似円形断面棒の実験結果と比較すると今度の実験では直径2耗のものも σ_B 、 σ_S は低下しておらず表面層の影響と見られるものが現われていない。

* 機械工学教室

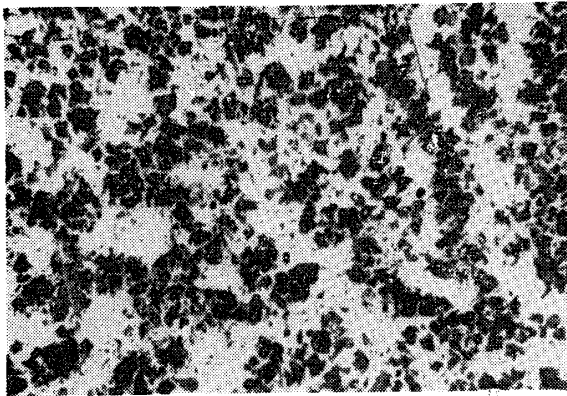
** 宇部興産株式会社



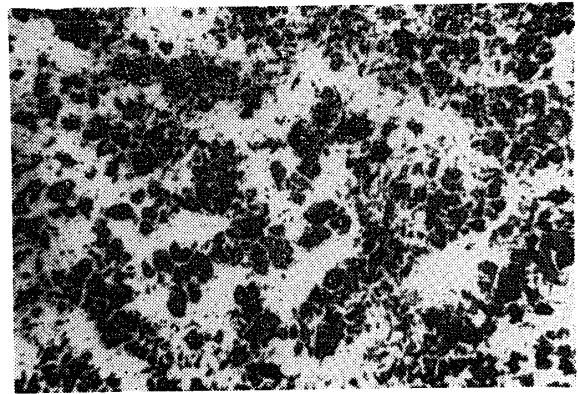
1 ×120



3 ×120



2 ×120



4 ×120

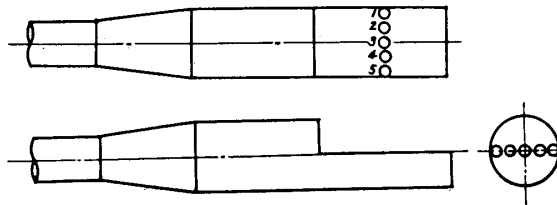


図1 顕微鏡組織

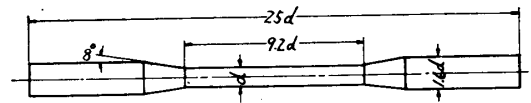


図3 試験片の寸法

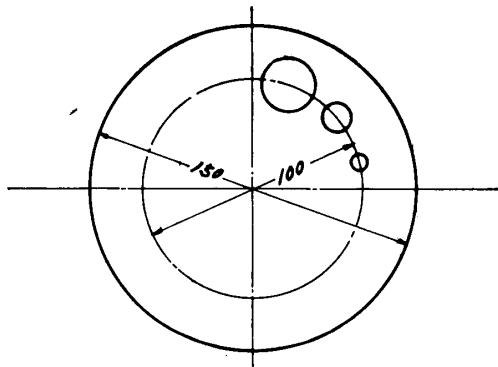


図2 試験片採取位置

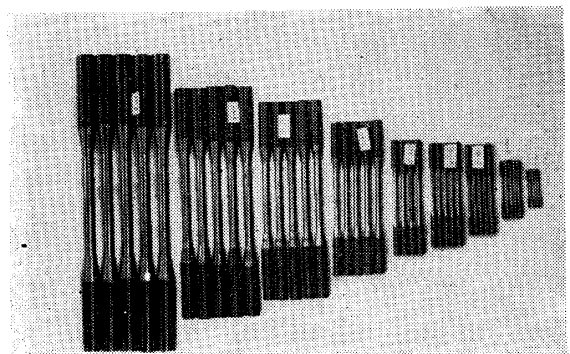


図4 試験前の試験片

図7に示す絞り部の半径 R と原直径 d との比率を調べると表2に見るごとく直径の大なるものほど d/R が大きく相似形のくびれを示していないことがわかる。これは断面収縮率の変化と関連している。以上引張試験による機械的性質のうち寸法効果の最も著しいものは断面収縮率であり、これは石橋氏²⁾の実験結果とも一致している。

表 2

試験前直径 d 、 R	2	3	4.5	5	6	8	10	12	15
R 、 d/R	1	1.6	2.3	2.5	3	4.7	6.7	8	9.5
	2	1.9	1.96	2	2	1.7	1.49	1.5	1.58

表 3

試験片番号	試験前直径 mm	試験後直径 mm	近似真伸率 %	断面収縮率 %	上降伏点 kg/mm^2	下降伏点 kg/mm^2	引張強さ kg/mm^2	破壊強さ kg/mm^2	真破壊強さ kg/mm^2
No. 1	2.03	1.13	28.0	69.0	—	34.3	55.6	42.3	136.6
2	2.02	1.18	29.4	66.2	38.3	37.1	56.6	43.3	128.0
3	2.03	1.15	29.4	67.9	37.1	36.5	54.7	40.8	127.1
4	2.02	1.17	27.9	66.5	38.4	37.9	57.1	42.1	125.6
5	2.02	1.12	30.4	69.3	40.6	38.1	56.2	42.1	137.0
6	3.02	1.78	26.2	65.3	39.1	34.9	54.9	40.5	116.5
7	3.01	1.81	28.5	63.8	40.0	36.5	55.2	41.4	114.7
8	3.01	1.82	34.0	63.4	38.9	36.5	54.8	41.9	114.5
9	3.00	1.75	20.8	66.0	40.5	36.2	54.8	41.2	121.8
10	2.96	1.69	27.1	67.4	36.7	36.3	55.4	42.5	129.3
11	4.49	2.73	30.2	62.9	35.7	35.1	54.1	42.1	113.9
12	4.51	2.72	35.2	63.6	36.1	35.7	55.1	42.1	115.5
13	4.51	2.71	29.3	63.9	36.5	35.9	55.8	42.6	117.9
14	4.46	2.67	31.4	64.2	37.4	37.0	56.3	42.6	118.8
15	4.49	2.70	28.1	63.8	36.3	36.1	55.6	41.8	115.6
16	5.00	2.97	29.3	64.7	36.4	35.7	55.9	44.3	125.6
17	5.01	3.01	31.1	63.8	36.0	35.4	55.4	42.1	115.9
18	4.93	3.03	28.5	62.5	37.8	37.2	56.5	42.5	113.3
19	4.98	3.05	28.6	62.5	35.9	35.2	55.8	42.6	113.6
20	4.99	3.02	29.5	63.4	37.1	36.1	55.7	42.2	115.2
21	6.00	3.84	25.9	59.0	35.7	35.2	56.0	44.6	108.8
22	5.99	3.77	26.4	60.4	36.4	35.6	54.5	42.2	106.6
23	5.99	3.71	26.4	61.6	36.4	35.7	54.6	42.1	109.6
24	6.00	3.83	26.1	59.3	36.4	35.9	55.4	43.1	105.9
25	8.01	5.08	25.1	59.8	36.8	35.5	54.5	42.5	105.6
26	8.02	5.38	24.2	55.0	35.7	33.8	53.6	41.5	91.9
27	8.01	5.06	23.6	60.1	36.3	34.7	54.5	42.3	105.9
28	7.99	5.08	24.1	59.6	36.1	35.3	55.0	43.3	107.1
29	8.01	5.13	20.1	60.0	36.1	34.5	54.9	42.7	104.0
30	10.01	6.56	27.9	57.1	36.5	34.6	54.4	43.3	100.9
31	9.91	6.42	23.9	58.0	40.1	35.0	54.5	43.8	104.4
32	10.00	6.26	23.9	60.8	36.7	34.0	55.2	41.1	104.9
33	9.98	6.59	21.6	56.4	36.9	34.3	53.6	42.1	96.5
34	9.98	6.49	25.2	57.7	38.2	35.2	53.9	42.1	99.5
35	12.01	7.74	27.6	58.5	36.6	35.1	54.6	42.8	103.1
36	12.01	7.90	24.9	56.7	35.7	34.9	54.1	42.8	98.9
37	12.01	7.85	22.5	57.3	37.1	35.2	54.3	42.4	99.2
38	11.95	7.73	29.6	58.2	38.6	34.8	54.9	42.8	102.3
39	11.98	7.87	25.6	56.8	36.4	35.2	54.9	43.1	99.7
40	14.64	8.90	29.0	63.0	31.4	29.1	46.6	36.1	97.6
41	14.82	9.51	22.1	62.3	34.1	32.5	51.0	41.0	98.5
42	14.57	9.55	23.6	57.0	36.9	35.0	54.5	42.5	98.8
43	14.62	9.48	22.6	57.9	36.6	35.5	54.4	42.6	101.3
44	14.66	9.53	22.9	57.7	37.3	34.8	54.5	42.8	101.2

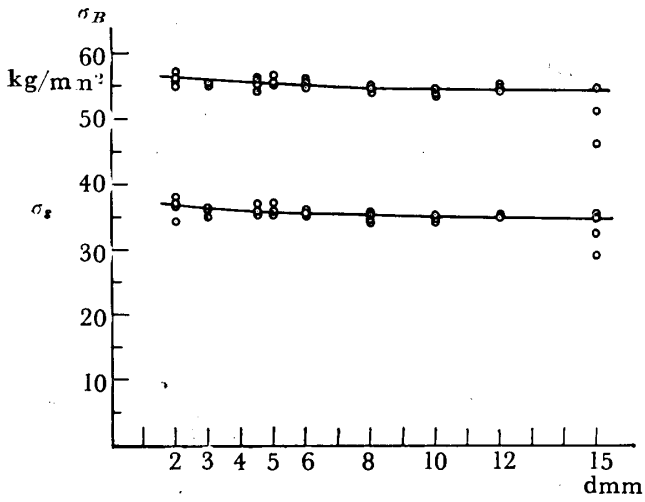


図5 引張強さ σ_B 降伏点 σ_s (相似円形断面)

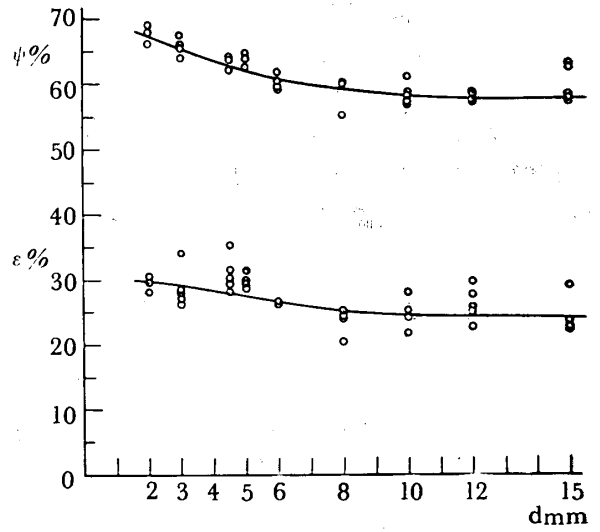


図6 断面収縮率 ψ , 伸率 ϵ (相似円形断面)

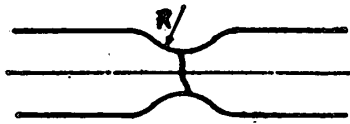


図 7

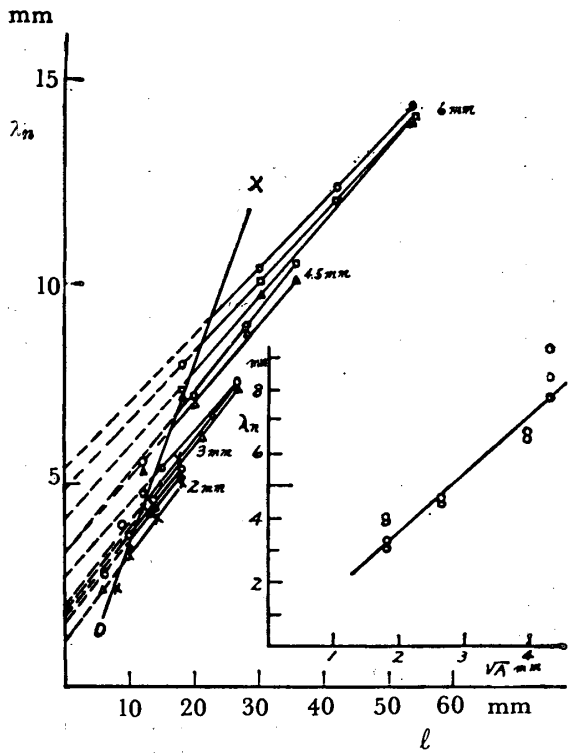


図8 原標点距離—伸線図(円形相似断面試験片)

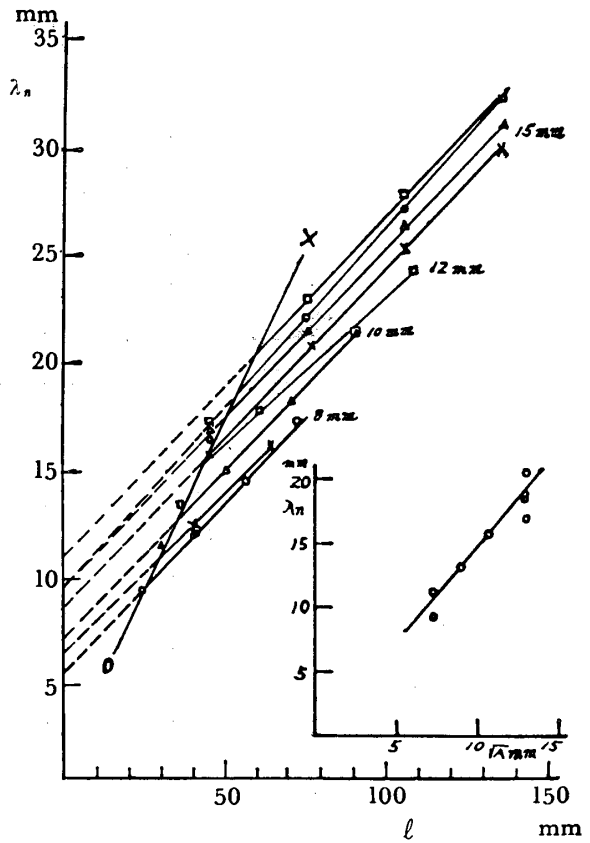


図9 原標点距離—伸線図(相似円形断面試験片)

これらの相似試験片において Barba の定数を定めるために各試験片の破断点を中心にとりその両側に原標点距離を測ったものを横軸にとり全伸を縦軸に示したものが図8および図9である。図中OX直線は各試験片の局部収縮部における曲率の変曲点の位置を示す。これは各試験片とも幾分その位置を異にするけれども共通的に一直線を引いたものである。この直線を境にして右側の測定点はほぼ一直線上にのるが、左側の測定点は右の直線の延長より下方に外れて曲線的関係で原点に向う。Barba の定数 β を決めるには各試験片についての直線部を延長して λ 軸との交点をとって算定するのが普通であるが、直線OXを引いたのでこれとの交点をとることにした。この場合 Barba の式を $\lambda = \alpha l + \beta \sqrt{A}$ とし直線OXの式を $\lambda = ml$ として

$$\beta n = \frac{\lambda_n}{\sqrt{A_n}}(m - \alpha) \quad n: \text{試験片記号}$$

となる。図8および図9より λ_n を求めてそれぞれの試験片の原断面積 A_n の平方根との関係を各図の右下半部に示した。測定点はほぼ原点を通る直線上にのり βn はほぼ同一値をとることになる。よってこの実験結果では

Barba の法則が成り立つものと見なされる。

3. 短形断面棒

3.1 相似形試験片

S30C 鋼板より図10および表4の矩形相似試験片を作り各試験片の両端標点間距離を精密目盛機によって20等分して標点を付した。これらの試験片は両端つかみ部の長さを除いてすべて相似形である。たゞ同一鋼板から各試験片を加工するに当って厚さ方向の組織の相異は無視した。各試験片は機械加工後850°Cで30分加熱した後、炉中除冷した。使用した試験機は25トンアムスラー万能試験機である。

表4 試験片 (S30C) 寸法

試験片	b_0	t_0	B	l	p	R	断面積, 耗 ²
No.1	8	4	12	40	44	5	32
No.2	16	8	24	80	38	10	128
No.3	24	12	36	120	132	15	298
No.4	32	16	48	160	176	20	512

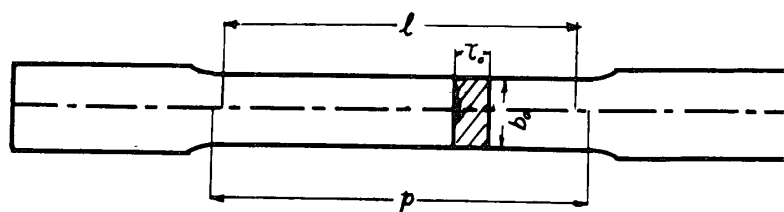


図10 矩形相似試験片 $d_0/t_0=2, l=5d_0$

表5は実験結果で図示すると図11となる。断面積 A が増せば引張強さ σ_B , 降伏点 σ_S は幾分低下する傾向が見られるが、これは前報図5と余り異ったものではない。伸 ϵ , 断面収縮率 ψ はこの図ではかなり著しく変化している。とくに ψ は前項の相似円形断面棒の場合と同様に寸法効果の顕著なことを示している。

試験片破断後の幅、厚さを測定し幅と厚さの縮少率を比較すると前報3項の場合と同様に厚さの収縮の方が幅の縮少よりわずかに大きくなるがこれを同一と見なして前報(2)式より

$$\epsilon = \frac{1}{\phi^2} - 1 \quad \phi = A + X^n \quad X=1, 2, 3 \dots\dots$$

で伸が示される。 n の値には前報の非相似試験片にて定めた $3/4$ がそのまま適用され、 A, B の値は本実験では $A=0.53, B=0.26$ が当てはまる。これよりこの標点部分の縦方向の全伸 λ_s は

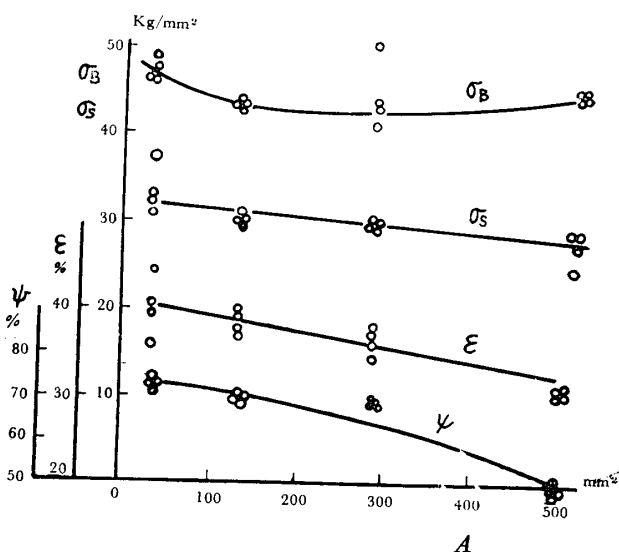


図11 矩形相似試験片の法効果

表5 実験結果 (矩形相似試験片)

試験片号	下降伏点 kg/mm ²	上降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	破壊強さ kg/mm ²	伸率 %	断面収縮 %	真破壊応力 kg/mm ²
1-1	30.61	30.93	45.74	33.51	25.5	70.4	92.3
1-2	32.52	33.15	45.78	34.10	31.6	74.0	94.1
1-3	37.10	37.42	47.74	35.48	39.3	70.1	92.87
1-4	33.31	33.96	48.19	35.57	40.7	74.2	138.2
2-1	29.92	30.37	43.45	30.15	39.7	70.5	101.9
2-2	29.56	30.97	43.45	29.80	38.5	69.9	99.07
2-3	31.28	31.97	43.74	30.22	35.7	70.2	119.5
2-4	29.41	29.72	43.54	30.40	36.2	69.7	100.2
3-1	29.66	30.55	43.21	32.96	37.1	73.0	125.2
3-2	29.78	29.95	43.90	33.84	35.8	73.9	130.0
3-3	30.10	31.67	50.90	34.12	38.0	68.8	129.5
3-4	29.09	31.26	41.75	33.59	34.0	72.7	123.0
4-1	28.95	29.18	44.70	44.70	20.68	47.5	77.1
4-2	27.50	28.13	45.10	40.60	30.8	49.2	79.8
4-3	28.95	29.97	44.70	40.10	31.4	52.8	84.7

$$\lambda_x = \Delta \left(\frac{1}{\phi^2} - 1 \right) \quad \text{ただし } \Delta = \text{標点分割間隔}$$

となる。この式で計算した λ_x は図12の実線のごとくなり、実験値×印はこの線上にのる。前報にて説明したように ϕ が上式で示され、 A, B, n が全試験片とも同一値をとれば先に図9で示したように $\lambda-l$ 線図のOXより

右側の部分が平行直線で示され、本実験結果では図13となる。ただし試験片No. 4群は除外した。右下図は図13より求めた λ_n と \sqrt{A} の関係を示す。 λ_n はOX直線と平行直線との交点である。この場合も実験値は原点を通る直線上にのるから α, β は一定となる。

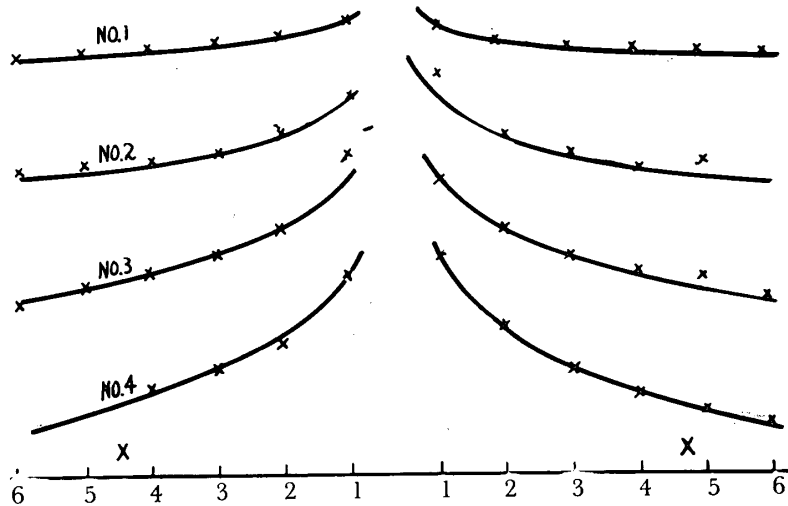


図12 実線： $\lambda_x = \Delta \left(\frac{1}{\phi^2} - 1 \right)$, $\phi = A + B \times n$
× : 実験値

3.2. $l/\sqrt{A} = \text{一定}$ の矩形断面試験片

標点距離と断面積の平方根との比を一定とした表6に示す試験片について実験した。材料はS.S.41で加工、熱処理の仕方は(1)と同様である。表7が実験結果で断面積を横軸にとって機械的性質を比較すれば図14となる。 σ_B, σ_S は断面積が大なるものほど幾分増大しているが、断面収縮率 ψ はAの増大とともに低下している。

表6 試験片(S.S.41)寸法 (図10の記号による)

試験片	b_0	t_0	l	B	P	R
A	27	3	72	42	84	15
B	16	4	64	24	74	15
C	50	8	120	75	130	25
D	32	9	94	54	104	25
E	40	10	120	60	130	25

Barba の定数の関係は図15のごとくなり、同図右下半に掲げた λ_n と \sqrt{A} の関係は原点を通る直線上にのっておらず、 β は一定とならない。すなわち本実験結果はアウイン、バルバの法則に当てはまっていない。

矩形断面試験片ではその幅と厚さの比の如何によって局部収縮に際してのネックの生じ方や破断の様式が異なる。筆者の実験によると薄い鋼板や黄銅板などの引張に

おいては幅方向に横断面と $20^\circ \sim 25^\circ$ 傾斜した方向に溝型ネックを生じ、これが直に破断面となる。厚さがある程度増すと初めに生じたネックと対称的な交叉ネックを生じ、破断はネックの交叉する中央部から生じ始める。破断面の形状は図16のように分類されるようである。(A)は皿型破面で正方形あるいはそれに近い試験片に生じ、円形断面棒の破断面形状に似ている。(B)は幅方向には傾斜せず厚さ方向に山形の傾斜をもつもので長方形度の大きい厚さの大なる試験片に生ずる。(C)は同じく厚さの方向に一方傾斜をもつもので厚さが比較的小なる試験片に生ずる。(D)は一方方向ネック破断で薄板に生ずるもので幅方向に $20 \sim 25^\circ$ 傾斜している。このような破断様式の相異は当然断面収縮率、局部伸率に直接影響することは当然と考えられ、したがって今度の $1/\sqrt{A}$ を一定とした試験片で局部伸率 β が \sqrt{A} に比例していない原因と考察する。

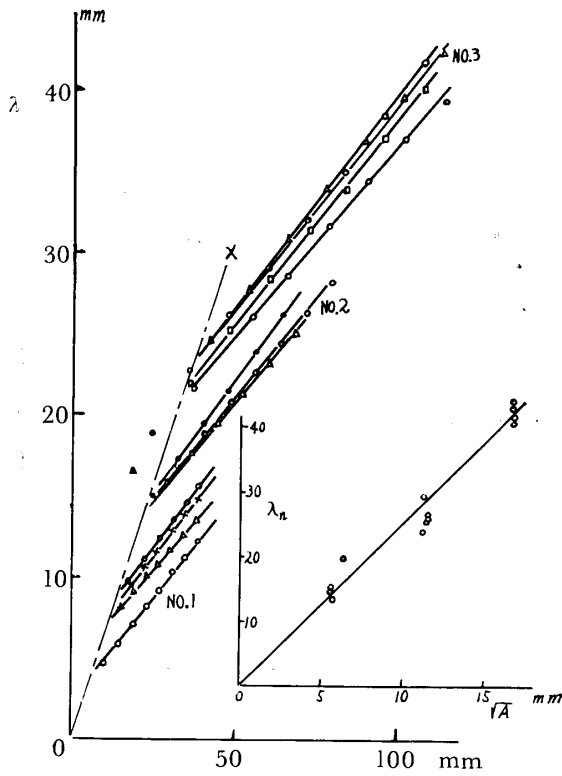


図13 原標点距離—伸線図 (矩形相似試験片)

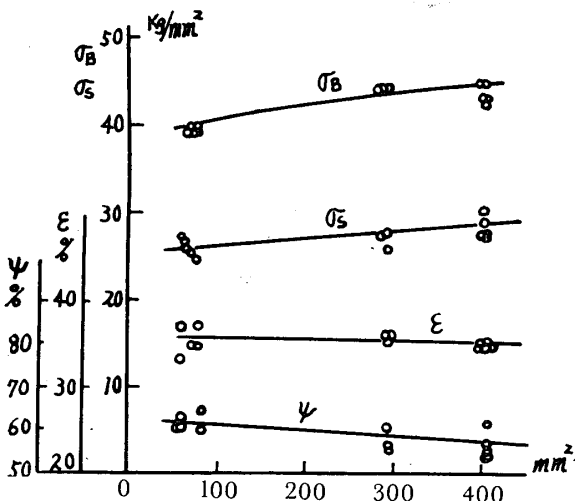


図14 l/\sqrt{A} =一定矩形試験片の寸法効果

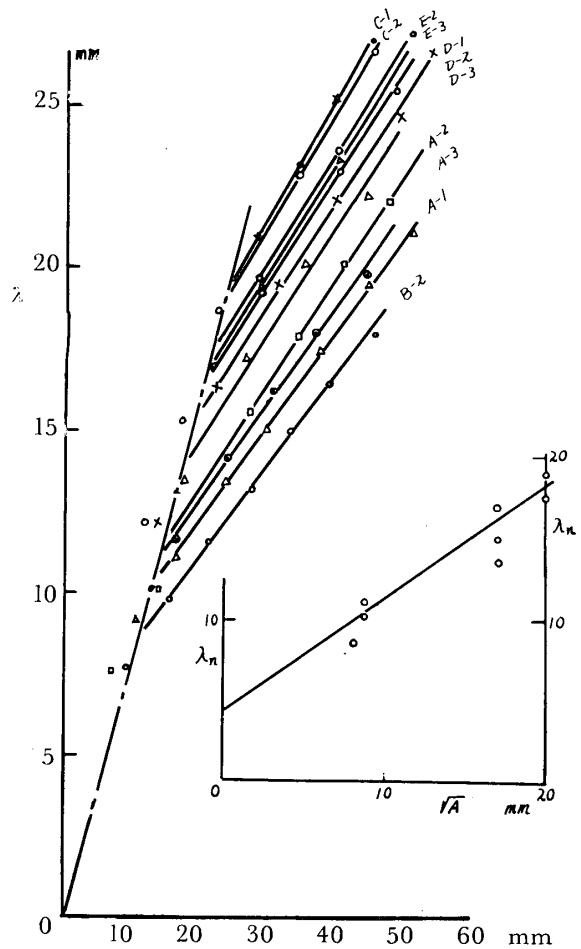


図15 原標点距離—伸線図 (l/\sqrt{A} =一定矩形試験片)

表7 実験結果 (l/\sqrt{A} =一定の試験片)

試験片番	下降伏点 kg/mm ²	上昇伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	破壊強さ kg/mm ²	伸率 %	断面収縮 %	真破壊応力 kg/mm ²
A-1	24.0	14.6	38.9	31.7	37.0	64.9	91.4
A-2	24.6	25.2	39.5	31.5	34.4	64.5	88.6
A-3	24.4	25.6	38.5	32.0	30.2	59.3	78.6
B-1	26.5	26.9	39.2	32.3	37.1	63.6	88.5
B-2	27.4	27.6	38.8	33.0	32.4	61.4	85.7
B-3	25.6	27.6	39.3	33.0	33.0	60.0	82.9
C-1	27.3	28.9	43.0	36.1	35.6	53.1	70.8
C-2	27.6	28.2	42.3	35.6	35.2	62.5	79.0
C-3	27.8	29.0	42.6	35.8	35.2	54.6	81.8
D-1	27.5	29.8	44.2	36.1	36.7	55.6	81.5
D-2	25.2	27.6	43.9	36.3	35.1	61.1	95.6
D-3	27.8	29.1	44.4	37.7	36.4	56.0	85.9
E-2	28.4	30.4	44.4	37.5	34.6	57.5	88.2
E-3	30.1	30.8	44.5	38.7	34.5	53.6	83.1

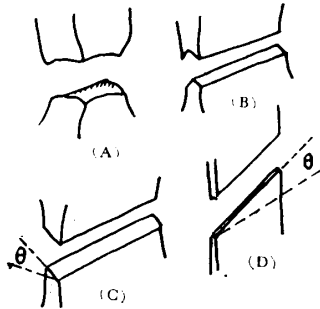


図16 矩形試験片の破面

図17は矩形試験片の破断直前に生じた対称ネックの交叉したもので、中央の交叉部分が最も薄くなりこの部分から破断がおこる。図18は黄銅薄板に生じたネックを示しこれでは交叉ネックを生ぜず、初めに生じたネック溝が写真に示すように破断面となり、破壊は必ずしも中央から生じない。薄い鋼板についても同様な実験結果を与えている。

4. 結 論

試験片の大小によって引張試験における降伏点や引張強さなどが異なるいわゆる寸法効果の主要な原因としては表面層および材料内部の欠陥があげられる。前報に記述した直径19耗の丸鋼を各試験片の素材としていずれもその中心を含んで削成した相似円形断面棒の実験では直径2耗のものが著しく強度が低く表面層の影響によるものと考えたが、今回の大型丸鋼より同心的に素材を採取して行なった実験では直径2耗の小試験片は一定の強度を保ち、前報の実験結果とは合致していない。したがってこの程度の寸法に対して常に表面層による強度低下が

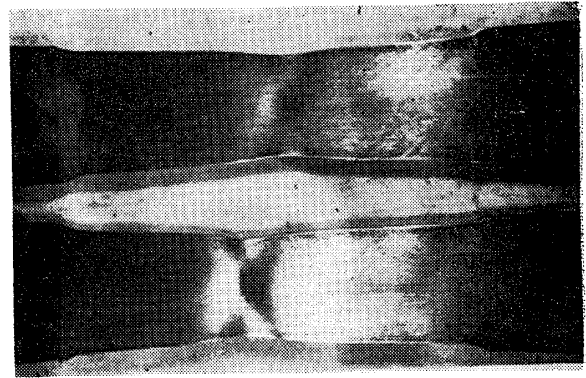


図17 軟鋼矩形試験片(幅35厚さ7.5mm)に生じたネックの交叉

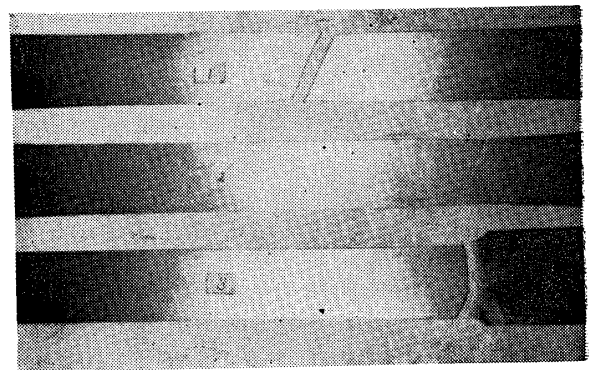


図18 薄板(黄銅板厚さ1mm)に生じたネックおよび破断状況

見られると考えるのは誤りであろう。すなわち材料が同質であれば試験片が最大荷重に達するまでの挙動は相似円形断面棒ではほぼ一定しており寸法効果の影響は割合に小さい。

寸法効果が顕著に現われるのは試験片が最大荷重点に

達して局部的塑性変形が起こり始めてから破断するに至るまでの間である。これは試験片の形は相似でも結晶粒や表面欠陥などの大きさは相似的でなく、ほぼ一定している関係から局部縮少を生ずるときの塑性流動は非相似となり縮少部の形、くびれの曲率半径、断面収縮率などが寸法の大小によって異なるものと考えられる。実験結果にみるように断面収縮率にはかなり著しい寸法効果が現われている。このような相似試験片では Barba の定数 α , β は、ほぼ一定となっているが、厳密な意味においては β には幾分の寸法効果が生ずるものと思う。

相似矩形棒では前報の非相似の場合と同様に幅/厚さの大なるものでは厚さ方向の収縮が、幅方向の収縮よりも若干大きくなる。これは局部縮少を起こす際の変位抵抗が幅方向に対して大きくなる結果である。破断後の試験片の輪廓形状を表わすため、局部縮少部の変曲点から両端に至る間を原標点距離 X の函数 ϕ を用いたが相似の各試験片に対しては同一の ϕ が適用されることがわかった。すなわち変曲点から両端に至る間はほぼ相似の変形をしている。寸法効果の著しく現われるのはやはり断

面収縮率である。この場合も Barba の定数 α , β はほぼ一定となっている。

β/\sqrt{A} を一定とした矩形棒でも引張強さ、降伏点などは相似矩形の場合とあまり変わらないが、断面形状が非相似であるために局部収縮に対してのネックの傾斜、破断様式などが異なる結果 Barba の定数 β も一定とならず、アインバルバの法則には当てはまっていない。

以上寸法効果に関する三つの実験結果について記した。矩形板の局部収縮に伴う現象についてはきわめて簡略に付言したが、降伏時のひずみ模様、ネッキングを生ずる方向などに関する理論的考察その他については、後の機会にゆずる。

なお、益富、長富は1項の相似円形断面試験片の実験を分担した。

参 考 文 献

- 1) 大野, 益富, 山本: 山口大学学报, 13 (1963)
- 2) 石橋正: 機械学会論文集, 21, (1955)