

鋼素材および鋼管材の機械的性質に及ぼす 寸法差の影響に関する研究

吉住 孝志*・土井 紀佳*

Influence of Size Difference on the Mechanical Properties of Material Specimen and Tubular Member in Steel

Takashi YOSHIZUMI and Noriyoshi DOI

ABSTRACT

To clarify the influence of the size difference on the *mechanical properties* of material specimens and tubular member in steel, *tension tests* in which the shape of cross section and gauge length were assumed to be variables were performed. The results are as follows.

Neither *yield point stress* nor *tensile strength* were influenced by the size difference of material specimen or tubular member. The *elongation* was greatly influenced by the size difference. If very long member is excluded, the *elongation* can be evaluated using either Barba's law or Oliver's law. If the authors' proposed law is used, the *elongation* considering the size difference can be evaluated better than when using another law. The *elongation* decreases but strength increases somewhat when concrete is filled inside the pipe. The *stress-strain relation* of the tubular member can be predicted by using the *stress-strain relation* obtained by the coupon tests. The *stress-strain relation* of square tubular member is affected by the properties of the seam and the corners of the member.

第1章 序

一般に、金属材料の基本的な機械的性質は、JIS に規定されている試験片寸法や方法に従って試験を行い、その試験結果から構造物の素材としての性質を得ている。しかし、構造物として使用される場合、その断面形状や長さはまちまちで、実際の機械的性質が異なってくることが予想される。特に、伸び ε_b (破断伸び) が寸法差に大きく影響されることは周知の事実である。

Barba 等は伸び ε_b と \sqrt{A}/L (A : 断面積, L : 標点距離) との間に、線形関係があることを唱えた。一方、Bartella, Oliver および白石等⁽¹⁾は、両者を対数表示した $\log \varepsilon_b$ と $\log \sqrt{A}/L$ との間にこそ線形関係があるとして、Barba の直線式よりも実際の場合によく一致していると述べている。白石等は実験により Oliver の方法の方が良好であることを確認している。また、日本鉄鋼協会では、伸

びに及ぼす寸法効果の影響について実際による詳細な検討がなされており、 $\log \varepsilon_b$ と $\log \sqrt{A}/L$ とは、引張強さが $590\text{N}/\text{mm}^2$ 級以下の鋼では、 $\log \sqrt{A}/L = -0.35 \sim -1.15$ ($L/d \doteq 2 \sim 12$) の範囲についてはほぼ直線であるとして、伸びの換算式 (Oliver の式) を与えている⁽²⁾。しかし、部材レベル (管材) 引張特性に関する研究^{(3)~(6)}はあるものの、寸法差に関する系統的な研究は皆無である。

本研究では、電炉材丸鋼や異形棒鋼、鋼板、円形鋼管、角形鋼管およびコンクリート充填管材の引張試験を行い、素材および管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響について実験的に明らかにすることを目的とする。管材に関しては、素材と管材との関係についても検討する。第2章では、構造用丸鋼および異形棒鋼の機械的性質に及ぼす寸法差の影響、第3章では、構造用鋼板の機械的性質に及ぼす寸法差の影響、第4章では、管材およびコンクリート充填管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響につ

* 建築設備工学科
平成10年8月25日受理

いて明らかにする。なお、これらの研究成果⁽⁷⁾⁻⁽¹³⁾は、これまで日本建築学会で発表してきたもので、これら一連の研究成果に若干加筆し、とりまとめたものである。

第2章 構造用丸鋼および異形棒鋼の機械的性質に及ぼす寸公差の影響

金属引張試験片に関する JIS Z 2201 解説⁽¹⁴⁾には、これらの研究成果をベースにして、JIS の規定寸法から外れるものに対して、その参考式 (Oliver の式) が掲載されている。

既往の研究成果が高炉材を対象としていることから、本章では、電炉材丸鋼および異形棒鋼の引張特性を明らかにし、実情に即した伸び (破断伸び) の式を提案する。

2.1 実験計画

2.1.1 使用材料

本試験に用いた材料は、市販の構造用棒鋼で、JIS 規格品である SR235 ($\phi 19$ および $\phi 25$) および SR235 相当品 ($\phi 13$) である。また、異形棒鋼は SD295A (D13, D19, D25) である。

2.1.2 試験片の採取要領

本試験用供試材は、試験片の材質をそろえるために、数ある鉄筋 (定尺もの: 6m) から 1本ずつ試験片を採取し、予備試験を行い決定した。なお、予備試験用の試験片の標点距離は JIS の規定に従って 8d とした。

2.1.3 試験片の形状および数

試験片は、丸鋼の径および標点距離の違いが引張特性に及ぼす影響を調べるために、以下のものを用意した。

- ①標点距離 L: 2d, 4d, 8d, 12d, 16d, 24d, 32d (d: 径)
- ②試験片: 機械加工によらず、素材そのものを適当な長さで切断した試験片による。

各標点距離に対し、基本的に最低3本の試験片を用意し、その少なくとも1本にはひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。丸鋼は72本、異形棒鋼は63本の引張試験を行った。

2.1.4 試験方法

試験は、1MN 万能試験機を用い、JIS の規定による荷重速度で引張試験を行った。なお、ひずみゲージを貼付した試験片の荷重速度は、低ひずみ域では約 3N/(mm²・s) と非常にゆっくりした速度、ひずみ硬化開始後は 10N/(mm²・s) 程度とした。

2.2 丸鋼の実験結果および考察

2.2.1 降伏点および引張強さと標点距離の関係

降伏点 σ_y および引張強さ σ_u と標点距離との関係を

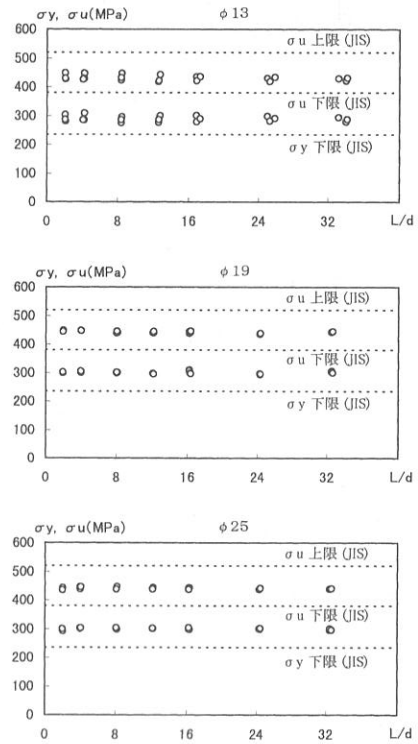


Fig. 1 降伏点および引張強さと標点距離 (L/d) の関係

Fig. 1 に示す。図中の破線は、降伏点および引張強さの JIS 規格値を表す。降伏点は断面や寸公差の影響を受けない。一方、引張強さは (L/d) に対してほぼ一定と見られるが、(L/d) の増加とともに僅かではあるが低下する傾向が認められる。これは、大ひずみ域では、標点距離の短いものほどグリップ部による変形の拘束効果の影響が現れ、逆に、標点距離の長いものでは材料の不均一さや断面の不均一さにより、弱い部分の影響が出やすくなるためと考えられる。

2.2.2 伸びと標点距離の関係

伸び (ϵ_b : 破断伸び) と標点距離と径の比 (L/d) との関係を図 2 に示す。図中の破線は、JIS 規格の下限値 (20%) である。伸びは (L/d) の増加とともに急激に低下し、一定値に近づく双曲線的な分布傾向を示している。8d 以上では、伸びの低下率は小さく、32d では 8d の場合の約 20% 減である。この理由としては、全伸びは一様伸びと局部伸びの和として考えられるが、ある一定の長さまでは全伸びに対する局部伸びの割合が大きくなり、それ以上の長さになると局部伸びの影響が小さくなるためと考

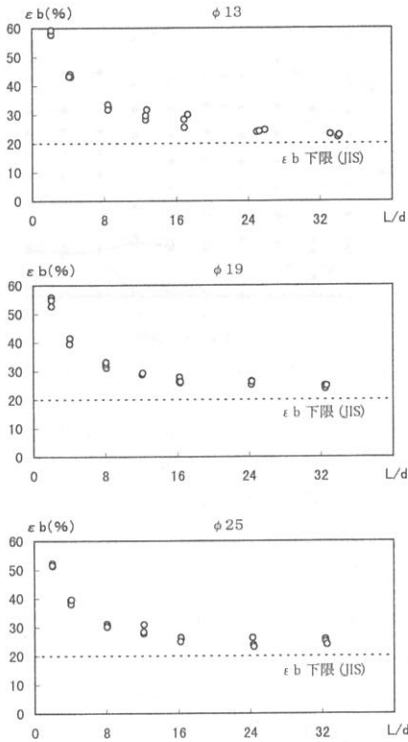


Fig. 2 伸びと標点距離 (L/d) の関係

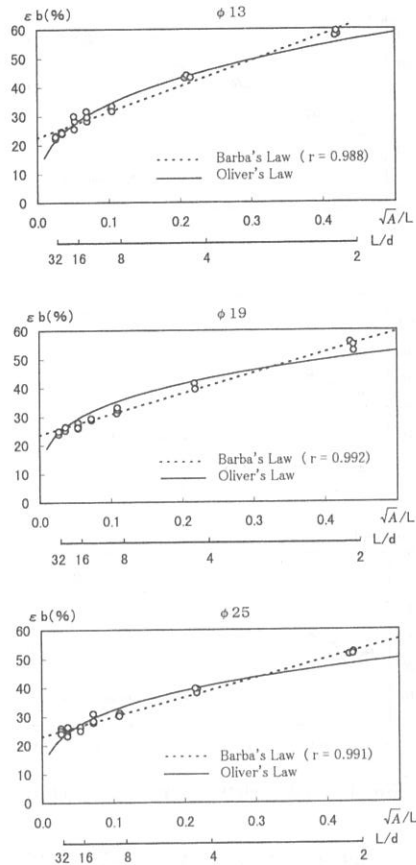


Fig. 3 伸びと \sqrt{A}/L の関係

えられる。

2. 2. 3 伸びとの関係

伸び (ϵ_b : 破断伸び) と \sqrt{A}/L (A : 断面積, L : 標点距離) との関係を図.3に示す。図中の一点鎖線は、最小2乗法による回帰直線である。図に示すように伸びと \sqrt{A}/L との関係は、ほぼ直線的な分布傾向を示している。これはBarbaの指摘と一致する。回帰直線の相関係数は、いずれもほぼ0.99であり相関性は高い。この回帰式はBarba等の式(1)に対応するものである。Barbaの式の右辺の第1項は一様伸び、第2項は局部伸びに対応し、非常にシンプルでかつ合理的な式といえよう。

$$\epsilon_b = \alpha + \beta \frac{\sqrt{A}}{L} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 α , β は実験により決まる定数。

一方、Barbaの主張に対して、Oliverは $\log \sqrt{A}/L$ と $\log \epsilon_b$ の間にこそ線形関係があるとしているが、これをと ϵ_b との関係に変換してプロットするとFig.3の破線のようなになる。このときのOliverの式は、下式で表わされる。

$$\epsilon_b = k \cdot \left(\frac{\sqrt{A}}{L} \right)^n \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 k , n は実験により決まる定数。

Oliverの式は \sqrt{A}/L が0.3以下では、実験値をよく説明しているが、0.5附近の非常に短い試験片では、伸びを過小評価する傾向が見られる。一方、Barbaの式はの大小に関わらず、実験値をよく説明しているようである。

2. 2. 4 伸びの提案式

前述のように、Barbaの式およびOliverの式は実験値との間にどちらも良好な相関がみられた。しかし、標点距離が無限大になると局部伸びの影響はなくなり、一様伸びが卓越してくることが予想され、Oliverの式は(2)式からもわかるように、伸びがゼロ(0)となり、矛盾点が生じてくる。また、短いと過小評価となる欠点を持っている。ISOの鋼の伸び値の換算に関する規格 (IS 2566/1) では、Oliverの式が使用されているが、実験値の分布

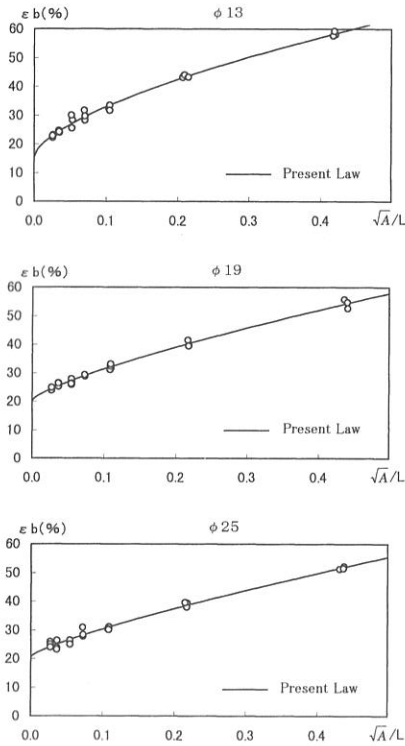


Fig. 4 丸鋼の伸びの提案式による回帰

状況をよく説明する式として、著者らは Oliver の式に一樣伸びの項を考慮した合理的な次式を提案する。

$$\epsilon_b = a + b \cdot \left(\frac{\sqrt{A}}{L}\right)^c \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 a 、 b 、 c は実験により決まる定数。

(3)式を径別および全試験結果に対して表したものを Fig.4 に示す。図からも明らかなように、Oliver の式の欠点をうまく修正している。

2. 2. 5 載荷過程における材軸方向のひずみ挙動

Fig.5に、代表的な例として標点距離32d の場合の載荷過程における材軸方向のひずみ挙動を示す。弾性範囲にある時は、各部のひずみはほぼ一樣であるが、ひずみ硬化の開始は、グリップ部(両端部)から起こりはじめ、中央部へと進行していく傾向が認められる。ひずみ硬化後は再び各部ともほぼ一樣にひずみが進行していくが、最終的には、一部の断面にひずみ集中が起こるとともに、くびれが顕在化し、破断に至る。

2. 3 異形棒鋼の実験結果および考察

Fig.6にひずみゲージ無貼付試験片、Fig.7にひずみゲ

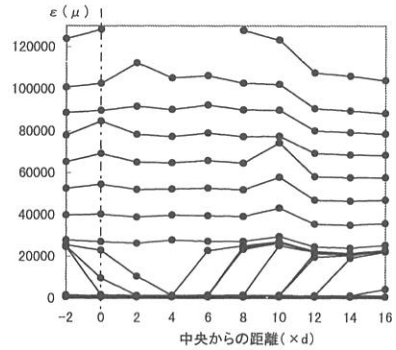


Fig. 5 載荷過程におけるひずみ挙動

ージ貼付試験片に対する異形棒鋼の試験結果を示す。なお、Fig.7中に伸びの JIS 規格下限値を示す。図からも明らかなように、Oliver および Barba の式ともに、実験値との対応は良好である。ひずみゲージ貼付試験片は、節

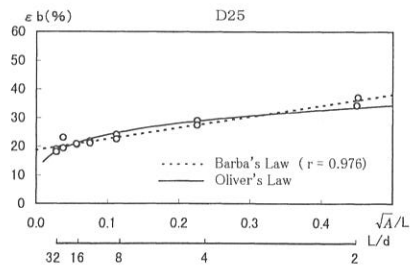
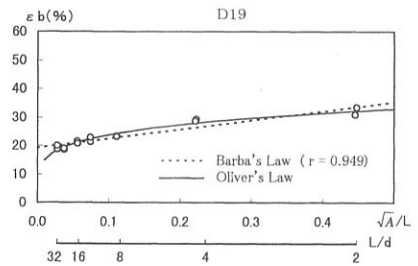
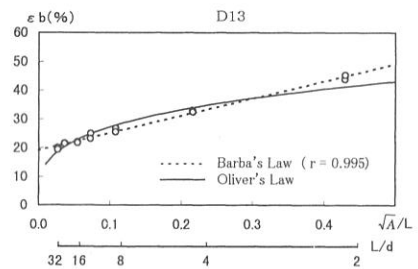


Fig. 6 異形棒鋼の伸びと \sqrt{A}/L の関係(ゲージ無貼付)

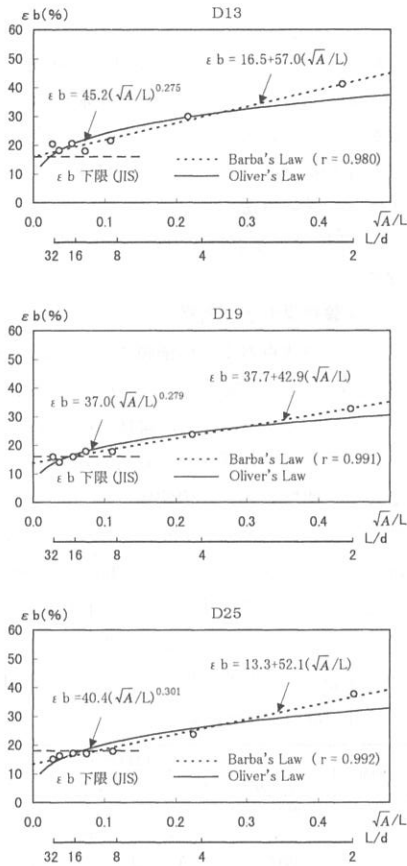


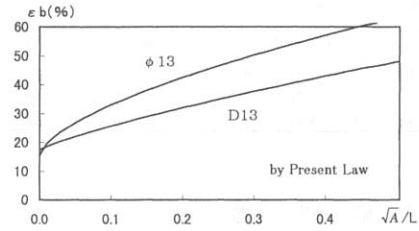
Fig. 7 異形棒鋼の伸びと \sqrt{A}/L の関係(ゲージ貼付)

間にひずみゲージを貼付するために鉄筋表面を研磨した関係で、若干の断面欠損が生じている。そのため研磨箇所にひずみが集中し、径が大きくなると伸びがJIS規格値よりも下回るものが出てくる。つまり、僅かな断面欠損の存在が伸び能力の低下を招くことになる。

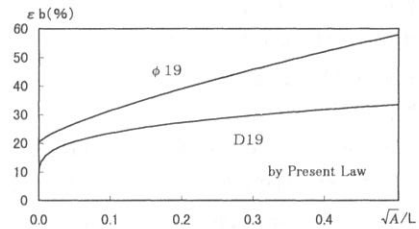
Fig.8は、ほぼ同径の構造用丸鋼と異形棒鋼(断面欠損なし)との伸び能力を提案式で比較したものである。図より、異形棒鋼は、節の存在がひずみ集中を助長させるために、丸鋼に比べ伸び能力が劣り、 \sqrt{A}/L が大きい範囲では、両者の差は大きくなる。

構造用丸鋼および異形棒鋼の伸びの回帰式を、それぞれ Table 1 および Table 2 に示す。

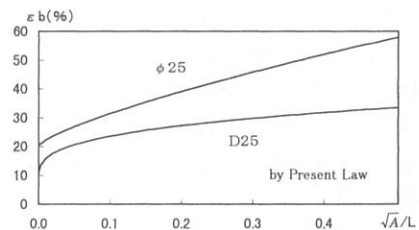
Table 3 に引張試験により得られた異形棒鋼の公称径に対する見かけのヤング係数を示す。表の数値から明らかのように、数値に若干のばらつきはあるものの、平均



(a) φ13とD13の比較



(b) φ19とD19の比較



(c) φ25とD25の比較

Fig. 8 丸鋼と異形棒鋼の比較 (提案式)

的に $1.81 \times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2$ 程度の値となっており、通常用いられる値 ($2.06 \times 10^5 \text{N}/\text{mm}^2$) の約9割弱程度となっている。鉄筋コンクリート系構造物の解析を行う際、この点に留意することが必要であろう。

Table 1 丸鋼の伸びの評価式

	Barba's Law	Oliver's Law	Present Law
φ 13	$22.5+88.8\sqrt{A}/L$	$74.1 (\sqrt{A}/L)^{0.337}$	$15.4+74.0 (\sqrt{A}/L)^{0.626}$
φ 19	$23.6+71.9\sqrt{A}/L$	$63.1 (\sqrt{A}/L)^{0.262}$	$20.3+63.6 (\sqrt{A}/L)^{0.760}$
φ 25	$23.0+67.5\sqrt{A}/L$	$60.3 (\sqrt{A}/L)^{0.273}$	$20.7+60.4 (\sqrt{A}/L)^{0.708}$
全体	$23.1+75.5\sqrt{A}/L$	$64.6 (\sqrt{A}/L)^{0.296}$	$18.8+65.3 (\sqrt{A}/L)^{0.712}$

A: 断面積, L: 標点距離

Table 2 異形棒鋼の伸びの評価式 (断面欠損なし)

	Barba's Law	Oliver's Law	Present Law
D13	$19.1+60.2\sqrt{A}/L$	$52.4 (\sqrt{A}/L)^{0.284}$	$17.3+64.1 (\sqrt{A}/L)^{0.813}$
D19	$19.2+32.2\sqrt{A}/L$	$37.8 (\sqrt{A}/L)^{0.202}$	$8.71+30.9 (\sqrt{A}/L)^{0.320}$
D25	$18.7+38.7\sqrt{A}/L$	$39.9 (\sqrt{A}/L)^{0.220}$	$17.2+34.8 (\sqrt{A}/L)^{0.789}$
全体	$19.0+43.1\sqrt{A}/L$	$42.8 (\sqrt{A}/L)^{0.234}$	$15.3+36.6 (\sqrt{A}/L)^{0.619}$

A: 断面積, L: 標点距離

Table 3 異形棒鋼の公称径に対する見かけのヤング係数 ($\times 10^5$ N/mm²)

呼称寸法	2d	4d	8d	12d	16d	24d	32d	平均	全体平均
D13	1.91	1.92	1.81	1.82	1.70	1.81	1.76	1.82	1.81
D19	1.90	1.89	1.71	1.74	1.72	1.79	1.85	1.80	
D25	1.85	1.83	1.83	1.90	1.77	1.79	1.80	1.82	

d: 径

2. 4 第2章のまとめ

構造用丸鋼および異形棒鋼の機械的性質に及ぼす寸法差の影響を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 降伏点は寸法差の影響を受けない。
- (2) 引張強さは標点距離の増加とともに低下するが、その影響は無視できる。
- (3) 伸び(破断伸び)は標点距離(L/d)の増加とともに低下する。この傾向は標点距離が8d以下で著しく、それ以上では低下の度合いは緩やかで一定値に近づく。
- (4) Barbaの式は、伸びの実験値と良好な対応関係にあることがわかった。一方、Oliverの式は $\sqrt{A}/L=0.3$ 以下では、伸びの分布傾向をよく説明するが、0.3以上の範囲では伸びを低く見積もる傾向がある。
- (5) Barbaの式とOliverの式の両者の欠点を補った提案式 $\epsilon_b = a + b \cdot (\sqrt{A}/L)^c$ は、伸びと \sqrt{A}/L の関係をより明確に表すことができる。
- (6) 異形棒鋼では節の影響によりひずみが節間の一部に集中する性質があるため、異形棒鋼の伸び能力は丸鋼に比べ劣る。特に、 \sqrt{A}/L が大きい範囲では、その差が顕著である。
- (7) 異形棒鋼の節間に少量の断面欠損があると、ひずみの集中が生じやすくなるため、伸び能力が劣る。

第3章 構造用鋼板の機械的性質に及ぼす寸法差の影響

本章では、第2章に引き続き、構造用鋼板の機械的性質に及ぼす寸法差の影響を実験的に明らかにする。

3. 1 実験計画

3. 1. 1 使用材料

本試験に用いた材料は、市販の構造用鋼板(SS400相当品)で板厚 $t=16\text{mm}$ のものである。

3. 1. 2 試験片の採取要領および形状

試験片は、すべて1枚の鋼板から長さ方向に採取し、JIS 1号試験片を含めて計17種類の試験片 (Fig.9参照) を1種類につき3本ずつ、総数51本の引張試験を行った。

3. 1. 3 実験変数

試験片は、鋼材の幅、厚さおよび標点距離の違いが引

張特性に及ぼす影響を調べるために、以下の実験変数のものを用意した。

①標点距離： $\sqrt{A}/L=0.075, 0.15, 0.30, 0.50$

②幅厚比： $w/t=1, 2, 3, 4$ (w :板幅, t :板厚)

実験変数に基づく試験片の幅、厚さおよび標点距離の公称寸法を Table 4示す。

3. 1. 4 試験方法

試験は、1MN 万能試験機を用い、JISの規定に準じて引張試験を行った。

3. 2 実験結果および考察

3. 2. 1 降伏点および引張強さと \sqrt{A}/L の関係

降伏点 σ_y および引張強さ σ_u と \sqrt{A}/L の関係を Fig.10に示す。図から明らかなように、降伏点 σ_y および引張強さ σ_u は、 \sqrt{A}/L の値に関係なく一定である。

3. 2. 2 伸びと \sqrt{A}/L の関係

破断伸 ϵ_b と \sqrt{A}/L の関係を Fig.11に示す。また、同図にOliverの式(一点鎖線)およびBarbaの式(破線)による回帰式を示している。Oliver および Barbaの式ともに、 \sqrt{A}/L に対する伸び ϵ_b をよく説明しているといえる。しかし、厳密には、丸鋼の場合で示したように、Oliver

Table 4 鋼板試験片の公称寸法

幅厚比 w/t	幅 $w(\text{mm})$	標点距離 $L(\text{mm})$			
		$\sqrt{A}/L=0.075$	$\sqrt{A}/L=0.15$	$\sqrt{A}/L=0.3$	$\sqrt{A}/L=0.5$
1	16	213.3	106.7	53.3	32.0
2	32	301.7	150.8	75.4	45.3
3	48	369.5	184.8	92.4	55.4
4	64	426.7	213.3	106.7	64.0

A: 断面積

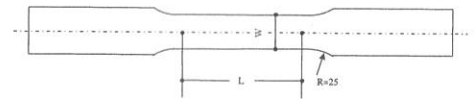


Fig. 9 鋼板試験片

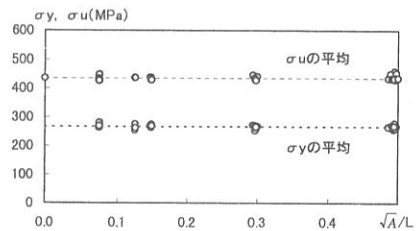
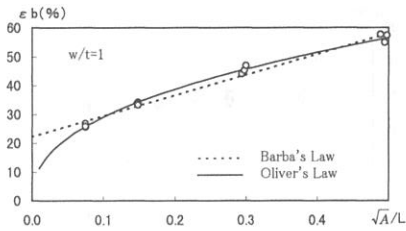
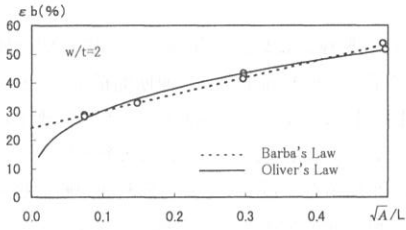


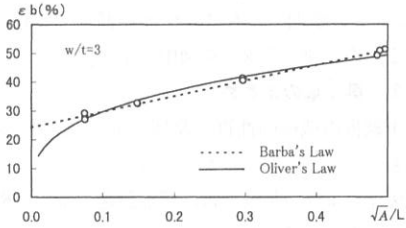
Fig. 10 降伏点および引張強さと \sqrt{A}/L の関係



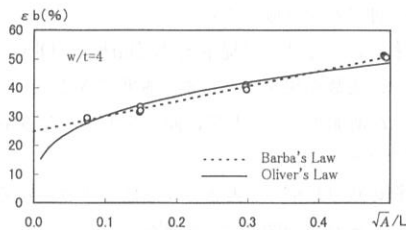
(a) $w/t=1$ の場合



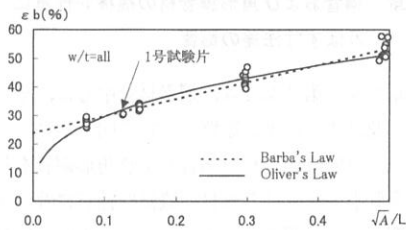
(b) $w/t=2$ の場合



(c) $w/t=3$ の場合

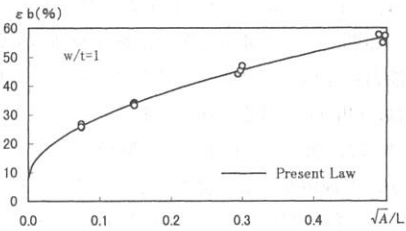


(d) $w/t=4$ の場合

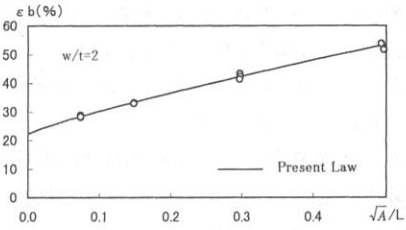


(e) すべての w/t に対して

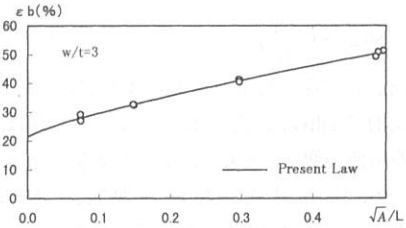
Fig. 11 構造用鋼板の伸びと \sqrt{A}/L の関係



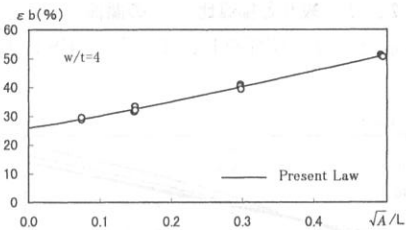
(a) $w/t=1$ の場合



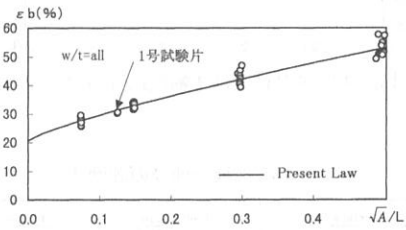
(b) $w/t=2$ の場合



(c) $w/t=3$ の場合



(d) $w/t=4$ の場合



(e) すべての w/t に対して

Fig. 12 構造用鋼板の伸びと提案式による回帰

の式では、 \sqrt{A}/L の値が大きい範囲および \sqrt{A}/L の範囲が小さい範囲、つまり非常に短い試験片や長い試験片では伸び能力 ϵ_b を低めに評価することになる。一方、Barbaの式では、Oliverとは逆の傾向がある。

Fig.12には、著者らの提案式と実験値との関係を示しているが、実験値をうまく説明していることがわかる。

Fig.13は、各幅厚比 w/t に対する提案式を示している。 w/t が大きいものほど、伸び ϵ_b と \sqrt{A}/L の関係における勾配が小さくなる傾向が見られる。しかし、 $\sqrt{A}/L=0.126$ 附近(1号試験片に相当)では、 w/t による差は認められない。Table 5に、本実験におけるBarbaの式、Oliverの式および提案式を示す。

ちなみに、日本鉄鋼協会では、400MPa級の炭素鋼鋼板平形試験片($\log \sqrt{A}/L = -0.35 \sim -1.15$)に対して、 w/t の影響についてはあまり差がないとみなしているため、次に示す1つのOliverの式で代表させている。

$$\epsilon_b = 80.27 \cdot \left(\frac{\sqrt{A}}{L}\right)^{0.444} \dots\dots\dots(4)$$

(4)式は、本実験では、 $w/t=1$ の場合にほぼ等しい。本実験におけるOliverの式では、 k および n の値は、両者とも w/t の値の増加とともに、小さくなる傾向を示している。一方、Barbaの式では、 w/t の増加とともに、係数 α は増加し、係数 β は減少の傾向を示している。提案式では、係数間にそのような傾向は認められない。

3. 2. 3 絞りと幅厚比 w/t の関係

絞り ϕ と w/t の関係をFig.14に示す。JISによると、

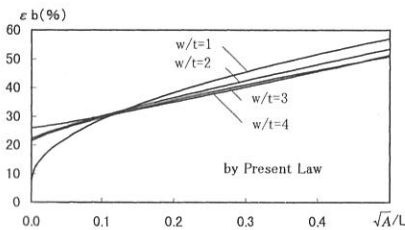


Fig. 13 伸びに及ぼす幅厚比 w/t の影響

Table 5 鋼板の伸びの評価式

w/t	Barba's Law	Oliver's Law	Present Law
1	$22.2+71.9(\sqrt{A}/L)$	$75.1(\sqrt{A}/L)^{0.412}$	$7.68+70.8(\sqrt{A}/L)^{0.521}$
2	$24.3+58.7(\sqrt{A}/L)$	$64.7(\sqrt{A}/L)^{0.330}$	$22.2+56.4(\sqrt{A}/L)^{0.852}$
3	$24.3+53.9(\sqrt{A}/L)$	$61.2(\sqrt{A}/L)^{0.314}$	$21.5+51.2(\sqrt{A}/L)^{0.801}$
4	$24.8+52.6(\sqrt{A}/L)$	$59.7(\sqrt{A}/L)^{0.295}$	$25.9+55.1(\sqrt{A}/L)^{1.120}$
全体	$23.8+59.6(\sqrt{A}/L)$	$65.0(\sqrt{A}/L)^{0.341}$	$20.7+56.8(\sqrt{A}/L)^{0.809}$

A: 断面積、L: 標点距離

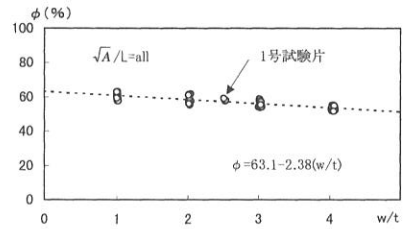


Fig. 14 絞り ϕ と幅厚 w/t との関係

絞り ϕ は円形棒の試験により得られた破断部の最小径に基づく最小円形断面積をA、原断面積を A_0 とした場合、 (A_0-A) の A_0 に対する割合(%)で評価することになっている。しかし、ここでは板破断部の厚さの平均値と幅の平均値を2辺とする長方形断面の断面積をA、長方形の原断面積を A_0 とし、次式で定義する。

$$\phi = 100 \cdot (A_0 - A) / A_0 \dots\dots\dots(5)$$

図より、 w/t の増加とともに絞り ϕ が減少する傾向が認められる。その回帰直線式を图中に示す。

3. 3 第3章のまとめ

構造用鋼板の機械的性質に及ぼす w/t との影響を調べた結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 降伏点および引張強さは、標点距離や w/t (板幅/板厚)の影響を受けない。
- (2) 実験条件の範囲では、BarbaおよびOliverの式でも十分に伸び ϵ_b を評価できる。
- (3) 著者らによる伸びの提案式は、BarbaやOliverの式に比べ、実験結果をよりうまく説明できる。
- (4) w/t が増加するにつれて、伸びが小さくなるが、 $w/t \geq 2$ ではその差は小さい。
- (5) 平鋼の絞りは w/t が大きくなるほど小さくなる傾向を示し、それらの関係は直線関係になる。

第4章 鋼管および角形鋼管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響

第2章および第3章では、鋼素材を中心に、その機械的性質に及ぼす寸法差の影響について明らかにしてきた。本章では、冷間成形された鋼管および角形鋼管を対象として、全管引張を受ける管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響について明らかにする。また、素材と管材の応力ひずみ関係の比較や鋼管内にコンクリートを充填した場合の効果についても検討を加える。

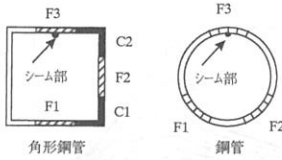


Fig. 15 素材試験片の採取位置

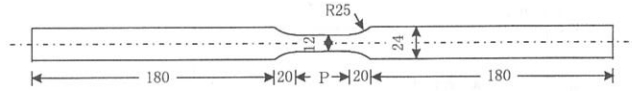


Fig. 16 鋼材の素材試験片

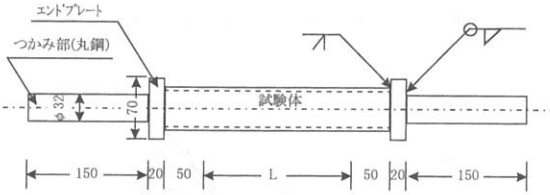


Fig. 17 鋼材試験体の形状寸法

Table 6 部材の公称寸法

部材断面	幅厚比 径厚比 D/t	標点距離 L(mm)			
		100	200	400	600
□—50×50×1.6	31	0.169	0.085	0.042	0.028
□—50×50×2.3	22	0.194	0.097	0.049	0.032
○—48.6×2.3	21	0.180	0.090	0.045	0.030
○—48.6×3.2	15	0.207	0.104	0.052	0.035

□：中空角形鋼管、○：中空鋼管、D：幅（外径）、t：管厚、A：断面積

4. 1 実験計画

4. 1. 1 使用材料

鋼材試験体は、STK400およびSTKR400相当品の冷間成形の鋼管および角形鋼管を用いた。また、充填用のコンクリートは、設計基準強度 $F_c = 24 \text{ N/mm}^2$ のものを用いた。

4. 1. 2 素材試験片の採取位置および形状寸法

Fig.15に鋼管および角形鋼管の素材試験片の採取位置を示す。Fig.16に鋼管および角形鋼管のフラット部およびコーナー部の水平投影図の素材試験片の形状寸法（14 B号試験片）を示す。標点距離は $5.65 \sqrt{A}$ である。

4. 1. 3 全管試験体の形状

鋼材試験体の形状寸法を Fig.17に、鋼管および角形鋼管の公称寸法および幅厚比 D/t 、標点距離、 \sqrt{A}/L の値を Table 6に示す。標点距離は鋼材の幅あるいは外径のおよそ 2, 4, 8, 12倍とし、エンドプレートから内側に50mm入った点間の距離とした。なお、試験体は試験要因につき、中空鋼管、コンクリート充填鋼管ともに2本ずつとした。

4. 1. 3 実験方法およびひずみ度の測定

試験は、1MN 万能試験機を用いて引張試験を行った。素材および鋼材には材中央に、材軸方向のひずみ分布計測用の試験体には、中央から5cmおきにひずみゲージを2～4枚貼付しひずみを測定した。

4. 2 実験結果および考察

4. 2. 1 素材の降伏点および引張強さと \sqrt{A}/L の関係

素材の引張試験結果を Fig.18に示す。角形鋼管、鋼管

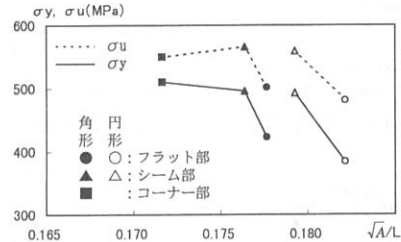


Fig. 18 素材試験片の σ_y , σ_u と \sqrt{A}/L の関係

ともにフラット部の降伏点 σ_y および引張強さ σ_u は、シーム部やコーナー部に比べて低いことがわかる。

4. 2. 2 鋼材の降伏点と \sqrt{A}/L の関係

Fig.19と Fig.20にそれぞれ中空鋼管およびコンクリート充填鋼管の降伏点 σ_y と \sqrt{A}/L の関係を示す。降伏点 σ_y は \sqrt{A}/L に関係なく、ほぼ一定である。コンクリート充填鋼管の σ_y は、中空鋼管に比べて若干小さい。

4. 2. 3 鋼材の引張強さと \sqrt{A}/L の関係

Fig.21と Fig.22にそれぞれ中空鋼管およびコンクリート充填鋼管の引張強さとの関係を示す。中空鋼管は、の増加とともに、僅かながら引張強さが上昇する傾向がある。これは、材長が短くなると溶接されたエンドプレ

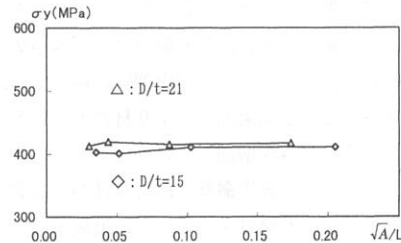


Fig. 19 中空鋼管の σ_y と \sqrt{A}/L の関係

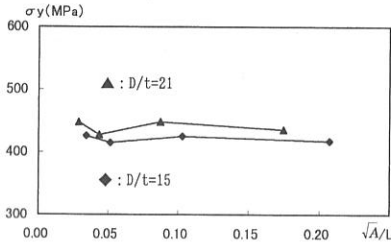


Fig. 20 コンクリート充填鋼管の σ_y と \sqrt{A}/L の関係

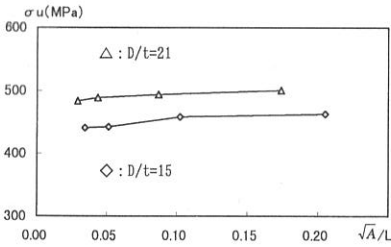


Fig. 21 中空鋼管の σ_u と \sqrt{A}/L の関係

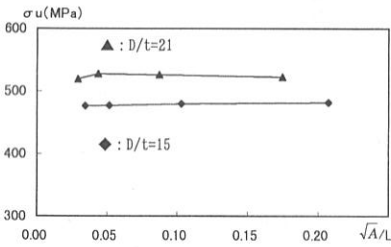


Fig. 22 コンクリート充填鋼管の σ_u と \sqrt{A}/L の関係

トにより、端部が変形（ひずみ）拘束の影響を受けるためと考えられる。一方、コンクリート充填鋼管には関係なく、ほぼ一定である。また、コンクリート充填鋼管の引張強さ σ_u は中空鋼管に比べ、充填コンクリートの拘束効果により高くなる。

4. 2. 4 管材の材軸方向のひずみ挙動

Fig.23およびFig.24に、それぞれ中空鋼管およびコンクリート充填鋼管における材軸方向のひずみ分布の推移を示す。中空鋼管の場合、破断個所にひずみが集中しているのに対し、コンクリート充填鋼管の場合では、充填コンクリートによる拘束効果により材軸方向にひずみが分散し、塑性ひずみが増加していく傾向がみられる。破断後、コンクリート充填鋼管の鋼管をはがして調べてみると、引張により充填コンクリートに亀裂がいくつも入っており、この亀裂部分に対応する表面の鋼管の塑性ひ

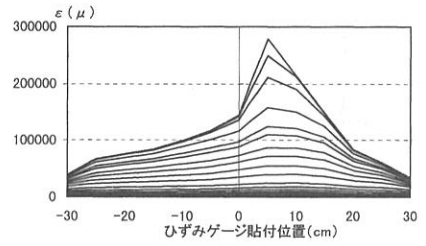


Fig. 23 ひずみ分布の推移（中空鋼管）

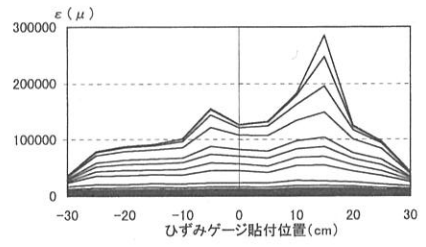


Fig. 24 ひずみ分布の推移（コンクリート充填鋼管）

ずみが僅かなくびれを伴いながら進行していることがわかった。

4. 2. 5 管材の伸びと \sqrt{A}/L の関係

Fig.25~Fig.27に管材の破断伸び ϵ_b と \sqrt{A}/L の関係を示す。伸び ϵ_b は寸法差（断面寸法や長さの違い）の影響を受けることは、既往の研究成果と同様である。実験条件の範囲では、Barba や Oliver の式でよく説明される

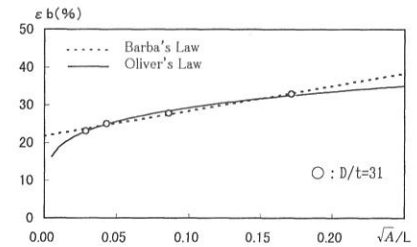


Fig. 25 中空角形鋼管の伸びと \sqrt{A}/L の関係

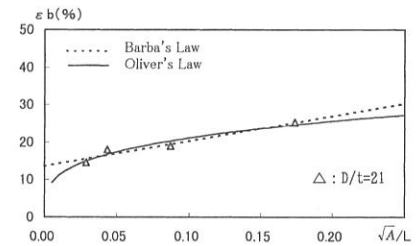


Fig. 26 中空鋼管の伸びと \sqrt{A}/L の関係

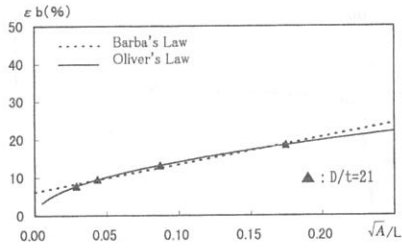


Fig. 27 コンクリート充填鋼管の伸びと \sqrt{A}/L の関係

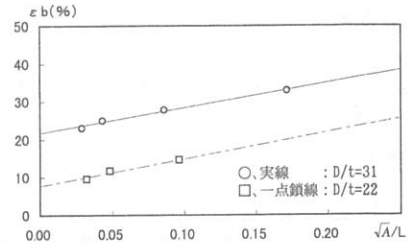


Fig. 28 伸びに及ぼす幅厚比の影響 (角形鋼管)

Table 7 鋼管および角形鋼管の伸びの評価式

部材断面	D/t	Barba's Law	Oliver's Law
□-50×50×1.6	31	$21.7+66.4\sqrt{A}/L$	$45.9(\sqrt{A}/L)^{0.195}$
□-50×50×2.3	22	$7.74+70.9\sqrt{A}/L$	$34.4(\sqrt{A}/L)^{0.306}$
○-48.6×2.3	21	$13.6+66.6\sqrt{A}/L$	$40.0(\sqrt{A}/L)^{0.278}$
○-48.6×3.2	15	$11.0+88.6\sqrt{A}/L$	$57.2(\sqrt{A}/L)^{0.436}$
●-48.6×2.3	21	$6.18+72.6\sqrt{A}/L$	$43.3(\sqrt{A}/L)^{0.486}$
●-48.6×3.2	15	$9.67+58.8\sqrt{A}/L$	$39.6(\sqrt{A}/L)^{0.584}$

□：中空角形鋼管、○：中空鋼管、●：コンクリート充填鋼管、D：幅（外径）、t：管厚
A：断面積、L：標点距離

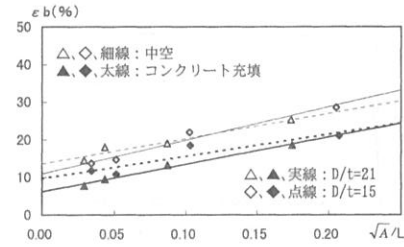


Fig. 29 伸びに及ぼす幅厚比の影響 (鋼管)

ことがわかる。

JISに規定によると、角形鋼管の素材試験片(11号、12号試験片および5号試験片)における伸びの下限値は、11号、12号試験片では23%、5号試験片では、18%となっている。また、(円形)鋼管では、5号試験片で17%以上の規定が設けられている。管材の伸びの実験結果は、素材試験レベルのJISの要求性能に比べ、著しく劣る結果が得られた。このことは、注目すべき結果である。特に、コンクリート充填管では、その傾向が顕著に現れる。

Table 7に鋼管および角形鋼管の伸びの評価式を示す。

4. 2. 6 管材の伸びに及ぼす幅厚比の影響

Fig.28に角形鋼管, Fig.29に鋼管の伸びに及ぼす幅厚比の影響を示す。角形鋼管の場合、幅厚比の大きいものが伸び能力に優れているが、鋼管の場合では、幅厚比による影響は認められなかった。また、コンクリート充填鋼管は、中空鋼管に比べ伸び能力が低下することがわかった。

4. 2. 7 素材と管材の応力-ひずみ関係

Fig.30およびFig.31に、それぞれ角形鋼管および鋼管の素材と管材の σ - ϵ 関係を示す。角形鋼管の場合、素材のフラット部が管材よりも応力がやや低い数値を示している。これは、シーム部およびコーナー部の影響を受けたためと考えられる。一方、鋼管の場合、素材のフラット部と管材の σ - ϵ 関係は、ほぼ同様の性状を示すことがわかった。これは、シーム部の支配面積が全断面積に比

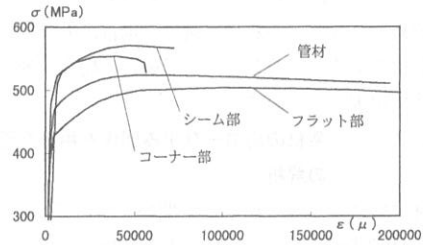


Fig. 30 角形鋼管の σ - ϵ 関係 ($D/t=22$)

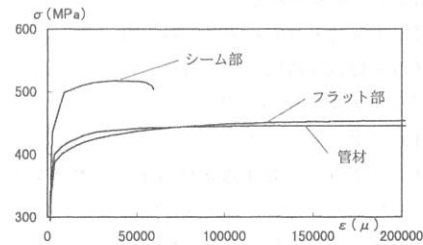
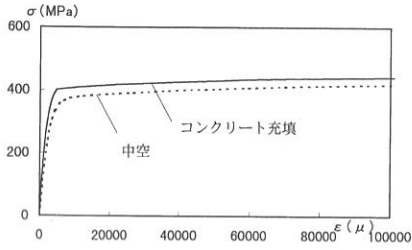


Fig. 31 鋼管の σ - ϵ 関係 ($D/t=15$)

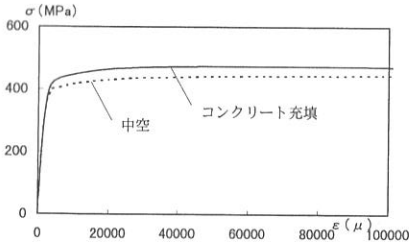
べて小さいため、管材全体の挙動にシーム部の影響が現れにくいためと考えられる。

4. 2. 8 中空鋼管とコンクリート充填鋼管の応力-ひずみ関係の比較

Fig.32に中空鋼管材とコンクリート充填鋼管材の σ - ϵ 関係の比較の一例を示す。角形鋼管の場合、中空のものがコンクリート充填のものに比べて、立ち上がり剛性が低



(a) 角形鋼管 ($D/t=31$)



(b) 鋼管 ($D/t=15$)

Fig. 32 中空鋼管材とコンクリート充填管材の σ - ϵ 関係

く現れているが、鋼管の場合、両者の立ち上がり剛性の差は認められない。これは、鋼管の場合、力学的に安定した形状であるのに対して、角形鋼管の場合は形状的不安定性に起因するものである。

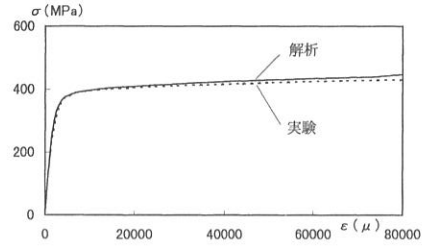
4. 2. 9 素材の応力-ひずみ関係を用いた管材の解析

素材試験により得られた σ - ϵ 関係を用いて、中空管材の σ - ϵ 関係を解析により求め、中空管材の実験結果との比較を行う。

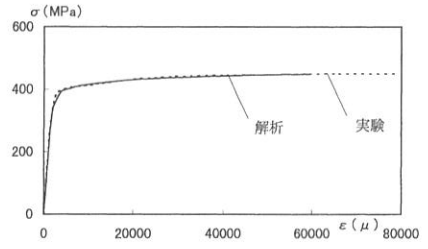
解析手順の概要を以下に示す。

- ①管材の実験結果(σ - ϵ 関係)の入力。
- ②管材の素材試験結果(シーム部, コーナー部, フラット部の σ - ϵ 関係)の入力。
- ③管材のひずみ ϵ を与える。
- ④管材のひずみ ϵ に対する素材各部の応力度を求める。
- ⑤管材のひずみ ϵ に対する素材各部の張力を求める。
- ⑥素材各部の合張力Fを求める。
- ⑦素材の合張力Fを管材の断面積Aで除して、管材の平均応力度 σ を求める。
- ⑧処理③~⑦を、所定のひずみ ϵ_{limit} に達するまで繰り返す。

前述の方法で得られた解析結果と中空角形鋼管および鋼管の実験結果との関係をFig.33に示す。両者の間に良好な一致が見られた。



(a) 角形鋼管 ($D/t=31$)



(b) 鋼管 ($D/t=15$)

Fig. 33 素材の σ - ϵ 関係を用いた管材の解析結果

4. 3 第4章のまとめ

鋼管, 角形鋼管およびコンクリート充填鋼管の機械的性質に及ぼす寸法差の影響を調べた結果, 以下のことが明らかになった。

- (1) 同一幅厚比のもとでは, 中空管材, 充填管材ともに \sqrt{A}/L の値に関係なく降伏点 σ_y はほぼ一定である。
- (2) 充填管材は中空管材に比べ σ_y および σ_u は高い。
- (3) 充填鋼管は, 材軸方向に塑性ひずみが分散する傾向を示す。
- (4) 破断伸び ϵ_o は, 寸法差の影響を大きく受けBarbaやOliverの式でよく説明できる。
- (5) 充填管材は, 中空管材に比べ, 伸び能力が低下する。
- (6) 角形鋼管の σ - ϵ 関係は, シーム部およびコーナー部の影響を受けるが, 鋼管はシーム部の影響はほとんど受けない。
- (7) 鋼管の場合, 中空, コンクリート充填ともに立ち上がり剛性(初期剛性)はほぼ同じであるが, 角形鋼管の場合, 中空の立ち上がり剛性はコンクリート充填のものよりも低く現れる。
- (8) 素材の σ - ϵ 関係がわかっているならば, 素材の σ - ϵ 関係から中空管材の σ - ϵ 関係が, 解析により, ほぼ予測できる。

第5章 結 論

素材および管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響を調べるための実験的研究により得られた第2章から第5章の主な結論を整理すると以下ようになる。

- (1) 素材, 管材を問わず, 降伏点および引張強さは寸法差の影響を受けない。
- (2) 素材, 管材を問わず, 伸びは寸法差の影響を大きく受ける。
- (3) 引張りによる管材(部材)の伸びは, \sqrt{A}/L との関係においてほぼ直線的な分布を示す。
- (4) 本実験条件から外れる, 非常に長い材を除けば, Barba の式, Oliver の式のいずれを用いても, 素材および部材の伸びを評価できる。
- (5) 筆者らの提案式を用いれば, 素材および鋼部材の寸法差を考慮した伸びをよりうまく評価できる。
- (6) 鋼管材の伸び能力は, JIS による素材試験片の伸びの要求性能に比べ著しく劣る。中空管にコンクリートを充填すると, 伸び能力の低下がより顕著になる。
- (7) 中空管材にコンクリートを充填すると強度は多少高くなる。
- (8) 管材の応力-ひずみ関係は, 素材の応力-ひずみ関係から解析的に求めることが可能である。
- (9) 角形鋼管材では, 素材コーナー部およびシーム部の影響を受け, 素材の応力-ひずみ関係と全管の応力-ひずみ関係との間には差が現れる。
- (10) 一様伸びは, Barba の式あるいは筆者らの提案式における第1項 (ϵ_0 軸との交点のひずみ値) が, 近似的に対応する。

謝 辞

実験に際し, 第2章では本学卒業研究生, 秋山龍夫, 小川 智, 第3章では大本栄治, 中島啓輔, 山崎健次, 第4章では東哲夫, 池下 学, 中山道春, 石井達之輔, 井戸綾子, 上村尚也の諸氏に協力を得ました。ここに深く謝意を表します。また, 第3章の研究は平成7年度久留米工業大学特別研究(研究代表者: 吉住孝志, 「構造用鋼板の機械的性質に及ぼす寸法差の影響に関する研究」), 第4章の研究は平成9年度特別研究(研究代表者: 吉住孝志, 「H形鋼およびコンクリート充填鋼管部材の引張り特性に関する研究」)により行った。

参考文献

- (1) 白石圭一, 赤堀暉生: “丸形引張試験片の寸法差が機械的性質におよぼす影響について”, 日本海事協会誌, 第122号, 1970. 3
- (2) 日本鉄鋼協会: “伸び値におよぼす試験片の寸法効果, データシートシリーズ2”, 1973. 2
- (3) 五十嵐定義, 辻岡静雄, 矢島 悟: “冷間成形鋼管の軸圧縮・引張耐力に関する実験的研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 1982. 10
- (4) 五十嵐定義, 辻岡静雄, 矢島 悟: “冷間成形角形鋼管の軸圧縮・引張耐力に関する実験的研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 1983. 9
- (5) 元田 徹, 坂恵一巳: “冷間ロール成形角形鋼管の全管引張り試験結果(その1)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 1994. 9
- (6) 坂恵一巳, 元田 徹: “冷間ロール成形角形鋼管の全管引張り試験結果(その2)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 1994. 9
- (7) 土井紀佳, 吉住孝志: “建築構造用棒鋼試験片の寸法差が機械的性質に及ぼす影響に関する研究”, 日本建築学会九州支部研究報告, 構造系, 第33号, 1991. 3
- (8) 吉住孝志, 土井紀佳: “異形棒鋼試験片の機械的性質に及ぼす寸法差の影響に関する研究”, 久留米工業大学知能工学研究所報告, 第4号, 1991. 6
- (9) 土井紀佳, 吉住孝志: “構造用棒鋼試験片の伸びに及ぼす寸法差の影響に関する研究”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 1991. 9
- (10) 土井紀佳, 吉住孝志: “構造用鋼板の機械的性質に及ぼす寸法差の影響に関する研究”, 日本建築学会中国・九州支部研究報告, 第10号, 1996. 3
- (11) 廣瀧勲, 吉住孝志, 土井紀佳: “冷間成形鋼管および角形鋼管の機械的性質に及ぼす寸法差の影響”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 1997. 9
- (12) 廣瀧勲, 吉住孝志, 土井紀佳: “中空鋼管材およびコンクリート充填鋼管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響(その1) 実験概要, 降伏点および引張強さ”, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 1998. 9
- (13) 土井紀佳, 吉住孝志: “中空鋼管材およびコンクリート充填鋼管材の機械的性質に及ぼす寸法差の影響(その2) 破断伸びおよび応力-ひずみ関係”, 日本建

築学会大会学術講演梗概集 (九州), 1998. 9

(14) JIS Z 2201金属材料試験片 解説