

鋼構造材の動的強度

(代表的な構造材 および 溶接部材)

谷村 眞治¹・三村 耕司²・榎田 努³・山田 哲⁴

¹正会員 工博 大阪府立大学 教授 工学研究科 機械システム工学分野 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

²工博 大阪府立大学 助教授 工学研究科 機械システム工学分野 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

³工博 大阪府立大学 助手 工学研究科 機械システム工学分野 (〒599-8531 大阪府堺市学園町 1-1)

⁴正会員 工博 東京工業大学 助教授 建築物理研究センター (〒226-8503 横浜市緑区長津田調 4259)

In order to precisely simulate the dynamic deformation or fracture process due to a strong earthquake, the exact constitutive models of materials used in the structures are indispensable. In the present paper, the dynamic properties of four kinds of SM490A based steels (one of the popular steels for building structures), which have different Charpy impact values are experimentally investigated in the wide range of strain rates from 10^{-2} to 10^3s^{-1} , and their stress-strain relations, strain rate sensitivities and absorbed energies which may be associated with Charpy impact values are presented. Furthermore, dynamic tensile properties of welded parts of several kinds of steels are experimentally investigated, and the strength distributions around the weld zones are estimated.

Key Words: strength of material, high and low toughness steels, weld zone, stress-strain relation, strain rate sensitivity, absorbed energy, high speed material test system, non-coaxial Hopkinson bar method

1. 緒言

鋼構造物に一般的に使用されている溶接構造用圧延鋼 SM490A 材と、これを基に改質して造られた靱性の異なる 3 種類の鋼 (SM490 A-A, B, C 材) の準静的ひずみ速度からひずみ速度 10^3s^{-1} に及ぶ広範囲のひずみ速度域での応力-ひずみ関係について検討した。また、これらの鋼材の変形挙動とシャルピー衝撃試験値との関連を調べるため、そのエネルギー吸収特性についての評価を行った。さらに、鋼構造物において部材間の結合に多用される溶接部の変形特性を明らかにするため、4 種類の一般構造用鋼板を用いて、母材と溶接部の動特性ならびに溶接部周辺の熱影響部の強度分布について明らかにした。

2. 構造用圧延鋼板の動的強度

(1) 試験材料 (SM490A-A, B, C, N 材)

本研究で使用した試験材料は、溶接構造用圧延鋼材として多用されている SM490A の市販材 (以下 N 材と表記) と、これを改質して造られた、シャルピー衝撃試験値の異なる A, B, C 材の合わせて 4 種類である。それぞれの鋼の化学成分を表-1 に示す。

(2) 試験装置および試験片

a) 試験装置

前報¹⁾と同様に、試験は全て引張試験で、試験装置には検力ブロック式高速材料試験システム (鷺宮製作所製, TS-2000) を用いた。本試験機では検力ブロック式の動荷重検出法^{2), 3)}を採用しており、長時間の荷重パルスに応力波の反射・干渉の影響を排して精度良く検出できる。

b) 試験片

図-1 に示すような平行部長さ 4mm, 直径 3mm の丸棒試験片を、幅 250mm, 長さ 350mm, 厚さ 25mm のブロックから、圧延方向と引張方向が一致するよう切り出して試験に供した。

(3) 試験結果ならびに考察

実験に用いた 4 種類の SM490A 材の機械的性質 (ミルシート記載) は表-2 に示すとおりで、基準となる N 材との比較では、A 材の高強度 (降伏応力 410MPa, 引張強さ 615MPa) と低靱性 (シャルピー衝撃試験値 = 15 J) が際立つものとなっている。また、B, C 材の降伏応力と引

表-1 試験材料の化学成分 (wt%)

Material (wt%)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	N	
SM490A	A	0.20	0.28	1.16	0.012	0.002	0.23	0.14	0.06	0.020	-	-
	B	0.17	0.39	1.43	0.020	0.006	0.01	0.03	-	0.004	-	-
	C	0.21	0.28	1.19	0.024	0.013	-	0.21	0.09	-	0.005	0.003
	N	0.16	0.22	1.50	0.020	0.005	-	-	-	-	-	-

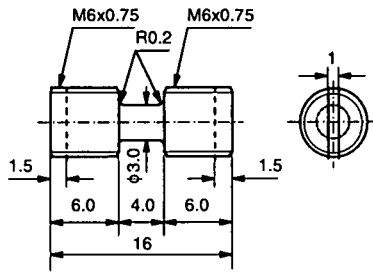


図-1 動的引張試験用試験片

表-2 試験材料の力学的特性

Material	Yield stress (MPa)	T.S. (MPa)	Charpy value (J) at 0°C
SM490A	A	410	15
	B	351	172
	C	321	60
	N	386	89

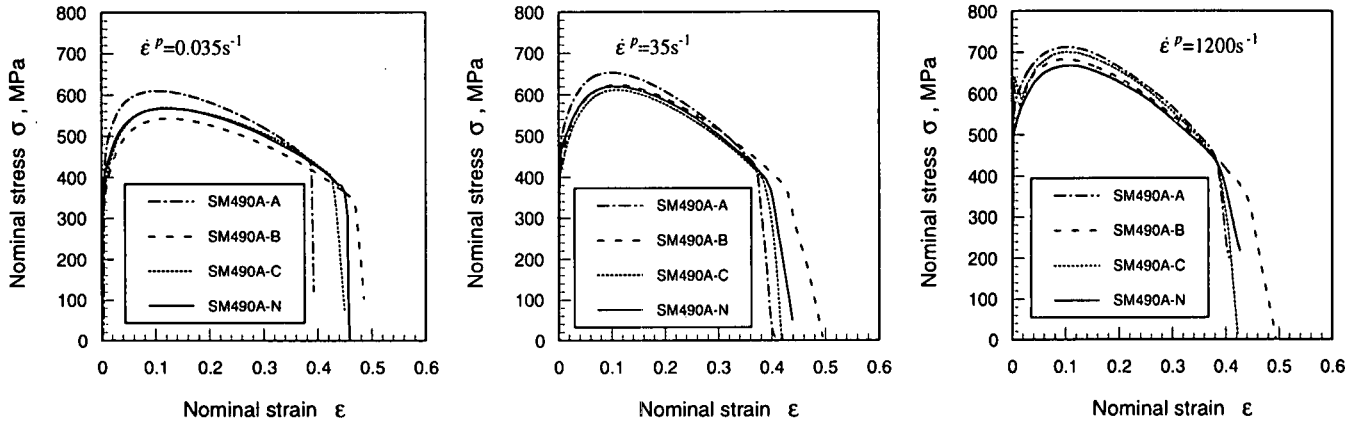


図-2 ひずみ速度 0.035s⁻¹, 35s⁻¹, 1200s⁻¹における SM490A-A, B, C 及び N 材の公称応力-公称ひずみ線図

張強さは、N材のそれに近いものとなっているが、B材のシャルピー衝撃試験値は172Jと、N材のそれ(89J)の約2倍に達する高靱性を示し、一方、C材のシャルピー衝撃値は60J程度と、N材のそれより若干低靱性を示すものとなっている。

これら4種類のSM490A材について、0.035s⁻¹, 3.5s⁻¹, 35s⁻¹, 250s⁻¹, 1200s⁻¹の5種類のひずみ速度で引張試験を実施し、得られた公称応力-公称ひずみ関係を、図-2に示すような3種類の代表ひずみ速度(0.035s⁻¹, 35s⁻¹, 1200s⁻¹)について整理した。

図-2より各ひずみ速度での破断ひずみの大きさは、B材が最も大きく、次いでN材、C材、A材の順となり、各材のシャルピー衝撃試験値の大きさの順に対応するものとなった。とくに、B材の破断ひずみの大きさは、低ひずみ速度($\dot{\epsilon}=0.035s^{-1}$)で0.48、高ひずみ速度($\dot{\epsilon}=1200s^{-1}$)でも0.45程度とかなり大きなものとなっている。

N材およびC材の破断ひずみは、低ひずみ速度($\dot{\epsilon}=0.035s^{-1}$)では0.45程度で、B材のそれよりも若干小さい程度であるが、ひずみ速度が大きくなるにしたがって、B材との差異は大きくなる。

一方、シャルピー衝撃値が最も小さいA材では、破断ひずみはひずみ速度にあまり依存せず、0.4近辺の値を採ることがわかる。

次に、各鋼の流動応力の比較では、いずれのひずみ速度でもA材が最も大きな流動抵抗を示すことがわかる。とくに低ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=0.035s^{-1}$ では、A材の引張強さは610MPaに達し、B, C, N材の引張強さより約60MPa~80MPaほど大きい。また、A材以外の、B, C, N材の流動応力の大きさの順位はひずみ速度によって変化しており、

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=0.035s^{-1}$ では $N(\cong C) > B$ 材の順であるが、 $\dot{\epsilon}=1200s^{-1}$ では $C > B > N$ 材の順となり、高ひずみ速度ではN材の動的強度が最も小さくなることがわかった。

次いで、各材料のひずみ速度依存性について検討する。図-3は静動比(動的応力の準静的応力に対する比率、本研究では $\dot{\epsilon}=0.035s^{-1}$ を準静的ひずみ速度と見なした)を用いて各鋼材のひずみ速度依存性を整理したものである。評価ひずみ量は0.02, 0.06および0.10の3種類とした。図より、各鋼の静動比(ひずみ速度依存性)は、ひずみ量の小さいほど一般に大きく、また、ひずみ速度100s⁻¹を超えるあたりから、その増加が著しくなる傾向がある。各鋼の比較では、まず、いずれの評価ひずみにおいても、B材のひずみ速度依存性が際立って大きい点が挙げられる。しかしながら、B材以外のひずみ速度依存性の相互関係は若干複雑であり、その強さの順位はひずみ速度100s⁻¹前後で変化して、 $\dot{\epsilon}=100s^{-1}$ 以下では $N > C > A$ 材であるのに対し、100s⁻¹以上では $C > N > A$ 材となる。とくに、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}=1200s^{-1}$ でのC材の静動比は、若干小さいものの、B材のそれにはほぼ匹敵する値を示すことがわかる。一方、A材のひずみ速度依存性は、ひずみ量に関わらず、4種類の鋼種中最も小さいものとなっている。

図-4は4種類の鋼材の「流動応力-ひずみ速度」関係を、0.02~0.10間の5つのひずみ点で評価したものである。図中の実線は、著者らが提案したひずみ速度依存性構成式^{4), 5)}：

$$\sigma = \sigma_s + (\alpha \epsilon^p + \beta) \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{CR}} \right) \ln(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_s^p) + B(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_u)^m \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_s^p \leq \dot{\epsilon}^p \leq 10^4 \sim 10^5 s^{-1}$$

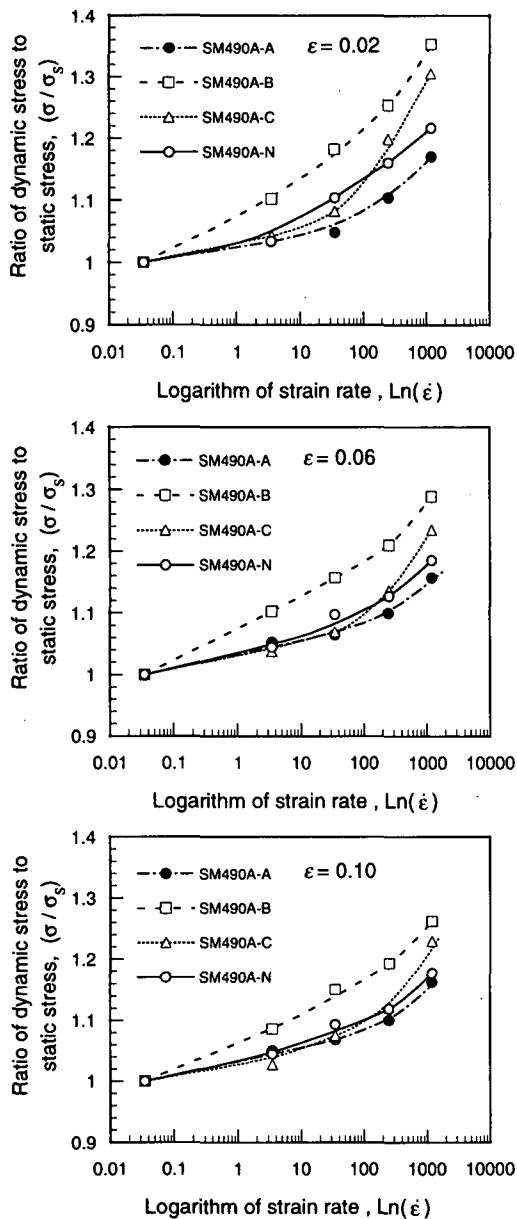


図-3 静動比による SM490A-A, B, C 及び N 材のひずみ速度依存性の比較

に基づく計算結果である。ここで、上式中の $\alpha, \beta, \sigma_{CR}$ の値は、鋼材に対する定数値 $\alpha = 19.5 \text{MPa}$, $\beta = -45.6 \text{MPa}$, $\sigma_{CR} = 4.7 \text{GPa}$ を用いた。また係数 B, m は、試みに $B = 0.025 \text{MPa}$, $m = 1.0$ に選んだ。B材については、計算結果と実験結果は、ひずみ速度 $0.035 \text{s}^{-1} \sim 1200 \text{s}^{-1}$ の領域全体でかなり良い一致を示すことがわかる。一方、C, N材では、ひずみ速度 0.035s^{-1} から 3.5s^{-1} までの領域における流動応力の実測値の増加は顕著ではなく、この結果、ひずみ速度 3.5s^{-1} 以上の領域で計算結果と実験結果は比較的良い一致を見ることとなった。また、A材は4鋼種中、最も流動応力のひずみ速度依存性が小さく、ひずみ速度 35s^{-1} 以上の領域で、計算結果と実験結果の一致を見ることが出来る。

最後に、試験材のシャルピー衝撃試験値との関連が予想される各鋼種のエネルギー吸収特性について検討する。図-5は4鋼種の試験片が吸収した単位体積あたりの塑

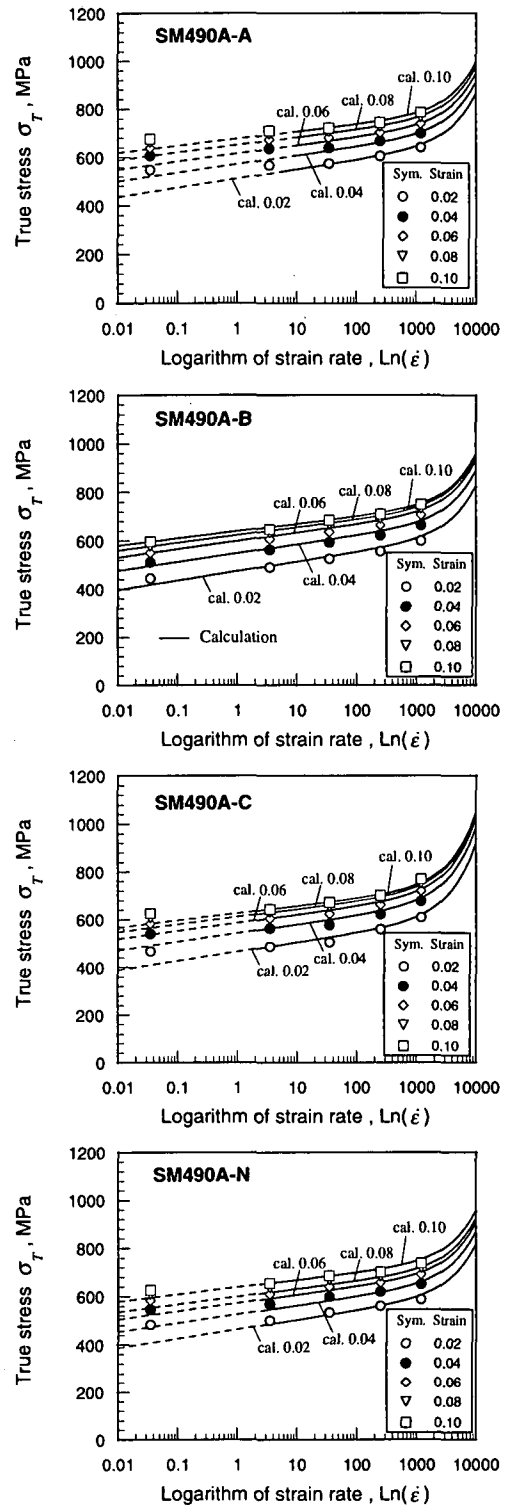


図-4 SM490A-A, B, C 及び N 材のひずみ速度依存性

性変形エネルギー (E_v) の変化を、ひずみ量を横軸として破断にいたるまで示したものである (E_v はひずみ速度が高い場合には衝撃吸収エネルギーと等価である)。例として、ひずみ速度 0.035s^{-1} , 35s^{-1} , 1200s^{-1} の場合を示した。 E_v は、いずれの試験ひずみ速度においても、同一のひずみ量で比較すると A材が最も大きくなっている。これは、A材が4鋼種中、同一ひずみ量での比較では、最も高い流動応力を示すことに対応する。A材以外の鋼材の E_v の大小も、各ひずみ速度での流動応力の大小の傾向

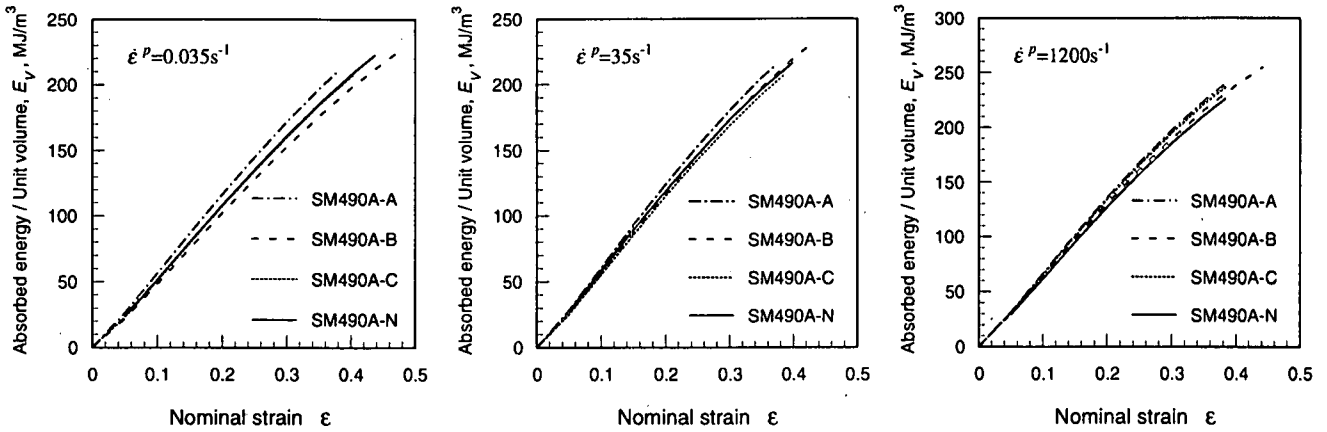


図-5 種々のひずみ速度におけるSM490A-A, B, C及びN材のエネルギー吸収特性

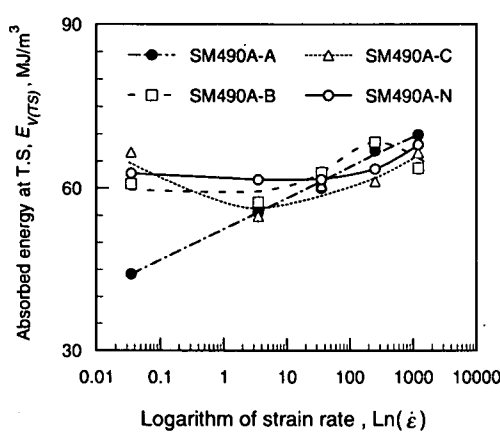


図-6 引張強さまでのエネルギー吸収特性の比較

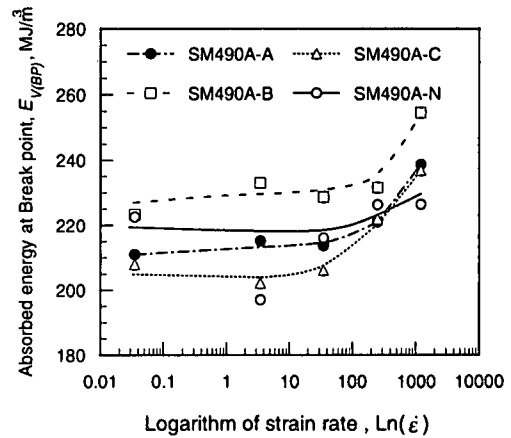


図-7 破断までのエネルギー吸収特性の比較

を反映し、試験ひずみ速度により順位が変動する結果となった。また、ひずみ速度が増大するにつれて、4鋼種間の E_V の差異は減少する傾向が認められる。しかしながら、同一ひずみ量での変形エネルギーの大小と、4鋼種のシャルピー衝撃試験値の大小とは、必ずしも対応するものとはなっていない。

そこで、さらに、4鋼種の引張強さおよび破断までに吸収した変形エネルギーの比較を試みた。図-6と図-7は、それぞれ引張強さ($E_{V(TS)}$)及び破断($E_{V(BP)}$)までの各鋼種のエネルギー吸収特性を比較したものである。

引張強さまでの吸収エネルギー($E_{V(TS)}$)を見ると、A材を除く3鋼種の $E_{V(TS)}$ はおよそ55~70 MJ/m³の範囲に収まっていることがわかる。しかし、材料間で明確な吸収エネルギーの大小関係は認められていない。また、これらの鋼の $E_{V(TS)}$ は、ひずみ速度3.5s⁻¹付近で一旦減少し、その後、ひずみ速度の上昇に伴って増加する傾向にある。一方、A材の $E_{V(TS)}$ は、準静的ひずみ速度(0.035s⁻¹)において、他の鋼のものよりかなり小さくなっている(45MJ/m³)。このことは、一見、A材のシャルピー衝撃試験値の低さと対応するようにも見えるが、A材の $E_{V(TS)}$ はその後、ひずみ速度にほぼ線形に増加してゆき、ひずみ速度35s⁻¹以上では他の鋼種とさほど差がなくなる。

次に、破断までのエネルギー吸収特性については、ひずみ速度1200s⁻¹のN材の結果を除けば、B, C, N材の $E_{V(BP)}$ の大小関係は概ねB > N > Cとなっており、各鋼の

シャルピー衝撃試験値の大小と良く対応していると言える。ただし、A材の $E_{V(BP)}$ はC材のそれよりも高くなっており、シャルピー衝撃試験値との対応は認められなかった。

3. 溶接部材の動的変形特性

(1) 試験機および試験方法

溶接試験片の引張試験には、非共軸型ホプキンソン棒法衝撃引張試験機^{6), 7)}を使用した。また、一部の試験については、検力ブロック式高速材料試験システムも併用した。供試材には270MPa級、440MPa級の一般構造用鋼板と590MPa級のDPおよび残留 γ オーステナイト鋼(R γ A)の4鋼種を選んだ。実験に使用した試験片の形状を図-8に示す。図は溶接試験片のものであり、図中にレーザー溶接部(溶接幅1mm)をハッチングで示しているが、母材のみの試験片も同一の形状を採用している。A群の試験片は速度依存性の評価に、またB群(平行部幅1, 2, 3mm)の試験片は溶接部近傍の熱影響部(HAZ: Heat Affected Area)の強度分布⁸⁾を調べるために使用した。

(2) 実験結果ならびに考察

図-9は各鋼の正規化ひずみ速度依存性 \bar{C} :

$$\bar{C} = (\sigma - \sigma_s) / \{\sigma_s \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s)\} \quad (2)$$

と準静的流動応力 σ_s との関係を示したものである。ここ

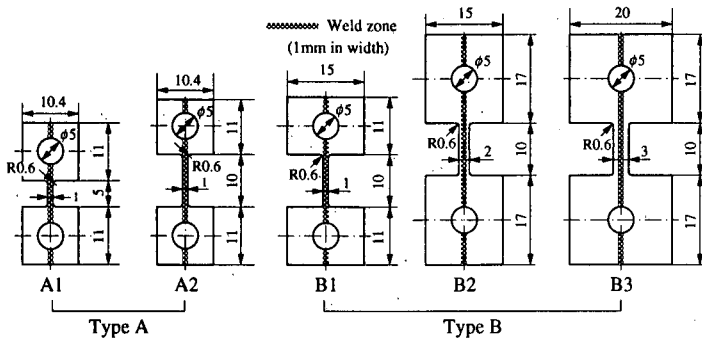


図-8 溶接試験片の形状及び寸法

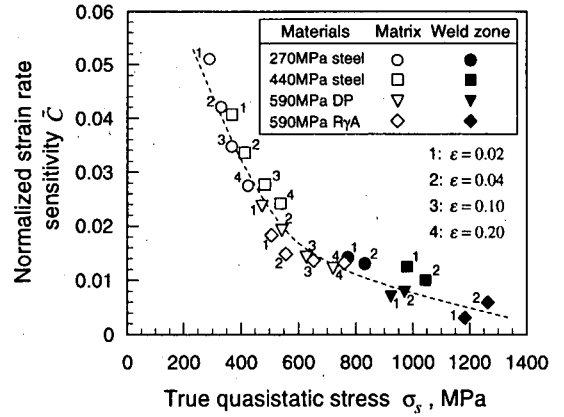


図-9 各鋼のひずみ速度感受性と準静的流動応力との関係 (母材および溶接部)

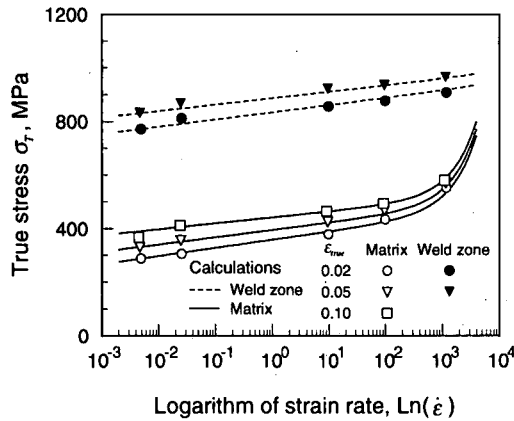


図-10 270MPa級鋼の母材及び溶接部の流動応力-ひずみ速度関係 (実験及び計算の比較)

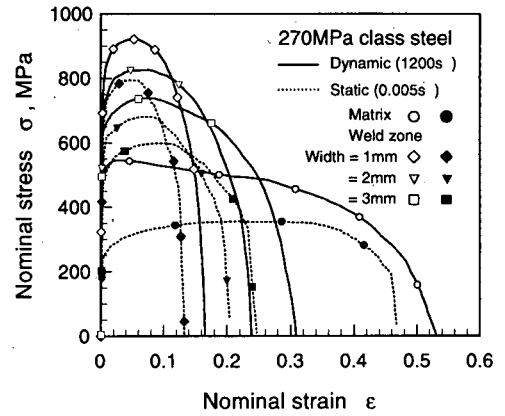


図-11 応力-ひずみ関係に及ぼす試験片の平行部幅の影響 (270MPa級鋼)

で $\dot{\epsilon}_s$ は準静的ひずみ速度を表し、ここでは $0.005s^{-1}$ に選んだ。図より各鋼の溶融部の準静的降伏応力は母材のそれの2~2.5倍に達することがわかる。各鋼の正規化ひずみ速度依存性 \bar{C} は σ_s の増加に伴って双曲的に減少しており、溶融部の速度依存性は、母材のその概ね半分程度となることからわかる。 \bar{C} が σ_s と双曲関係にあることは、これらの鋼種の母材と溶接溶融部のひずみ速度依存性が式(1)で表されることを示唆している。例として図-10に270MPa級鋼の母材と溶融部の流動応力とひずみ速度の関係を示した。図中の実線および破線は、式(1)による計算結果を示している。なお、式(1)中の B, m についてはそれぞれ0.07, 1.0に選んだ。計算値は実験値を良く近似し得ることがわかる。

次に溶接溶融部の近傍の強度分布に関して検討する。一般に溶接では、溶融部の周りに熱影響域 (HAZ) が存在し、この領域では、部材強度が溶融部からの距離に応じて減少しているものと考えられる。このようなHAZにおける強度分布の解明は、数値解析等で構造体接合部の強度予測を行う場合に非常に有効であると考えられる。図-11は、溶接溶融部の幅を一定(1.0mm)とし、試験片平行部幅を1mm~3mmに変化させた場合に得られた、応力-ひずみ線図を示したものである。なお、ここでは例として270MPa級鋼の結果を示したが、他の3鋼種にお

いても同様の結果が得られている。試験片平行部幅が増加するにしたがって、溶融部周辺のHAZ域をより多く含むため、見かけの流動応力は減少し、一方、破断のびは増加する。また、破断伸びはひずみ速度の影響を受け、高ひずみ速度ほど増大する傾向が認められる。このような高ひずみ速度における破断伸びの増加には、局所断熱変形による熱発生が関与している可能性もある。

図-11の結果より、HAZ領域の広がりとその強度分布を推定を試みる。図-12はHAZを含む溶接部周辺の強度分布のモデルを示したものである。図のように溶融部の幅を a 、試験片平行部幅を B 、溶融部の強度を σ_w 、母材の強度を σ_M 、平行部中心からの距離を x と置き、溶融部外側の強度分布 $f(x)$ が、 x^n に反比例するとすると次式を仮定できる。

$$f(x) = \sigma_w + (\sigma_M - \sigma_w) \{1 - (a/2x)^n\} \quad (3)$$

式(3)に基づき、平行部幅 B の試験片の平均応力 $\bar{\sigma}$ を求めると、

$$\bar{\sigma} = \sigma_w + (\sigma_M - \sigma_w) \left(1 - \frac{n}{n-1} \zeta + \frac{1}{n-1} \zeta^n\right) \quad \text{for } n \neq 1 \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_w + (\sigma_M - \sigma_w) \left(1 - \zeta + \frac{1}{2} \ln \zeta\right) \quad \text{for } n = 1$$

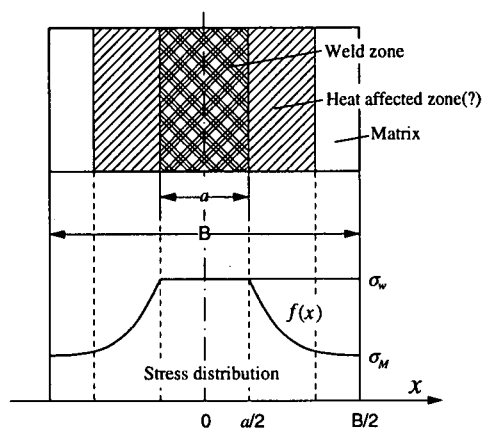


図-12 HAZを含む溶接部周辺の強度分布のモデル

を得る。ここで、 $\zeta = (a/B)$ は特徴長さである。図-13 は4種類の鋼の試験片平行部の平均応力 $\bar{\sigma}$ と ζ との関係の一例を示したものである。図中の曲線は式(4)で $n=2$ と置いた場合の計算結果を示す。計算値は実験値を良く近似していることが分かる。以上の結果から、HAZを含む溶接部周辺の強度分布の推定を試みた。図-14は、270MPa級鋼で、 $\epsilon = 0.02$ の場合の試験片平行部の強度分布を計算した結果である。図中の実線は動的変形、破線は準静的変形の場合の強度分布を示している。図よりHAZ部は、溶融部幅 a のおよそ6倍の広がりを持っていることが推定できる。

4. 結言

靱性の異なる4種類のSM490A材について、準静的変形からひずみ速度 $1200s^{-1}$ に至るまでの高速変形を与えた場合の応力-ひずみ関係、ひずみ速度依存性について明らかにした。また、これらの材料のエネルギー吸収特性について検討し、そのシャルピー衝撃試験値との関連性について議論した。

さらに、4種類の鋼(270MPa, 440MPa, 590MPa DP & RyA 鋼)に対し、母材と溶接溶融部の応力-ひずみ関係ならびに、そのひずみ速度依存性を明らかにすると共に、溶接部周辺の材料強度分布のモデル化とその推定を実施し、有用な知見を得た。

謝辞:本研究の一部は、平成13年度 科学技術振興調整費(総合研究「構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上の研究」の第3分科会の分担課題の1つ)の支援を受けたことを付記し、謝意を表す。

参考文献

1. 谷村眞治, 三村耕司, 山田哲: 鋼構造材の動的強度(高靱性材, 低靱性材および溶接部材), 第2回 構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp135-140, 2001.

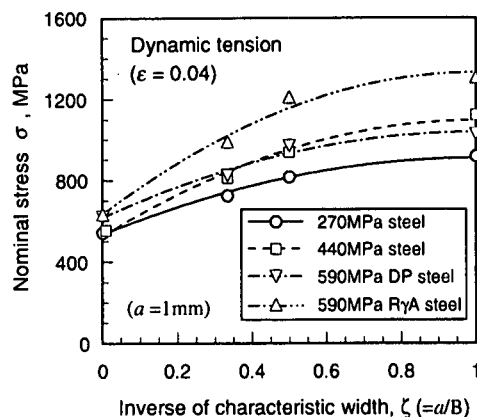


図-13 試験片平行部の平均応力 $\bar{\sigma}$ に及ぼす特徴長さ ζ の影響

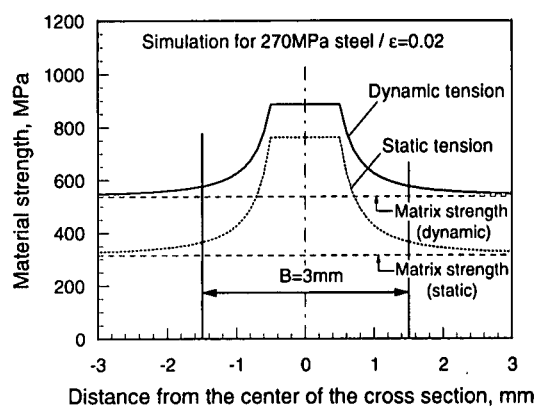


図-14 HAZを含む溶接部周辺の強度分布のシミュレーション(270MPa級鋼)

2. Tanimura, S.: A New Method for Measuring Impulsive Force at Contact Parts, *Exp. Mech.*, 24-4, pp271-276, 1984

3. Chuman, Y., Mimura, K., Kaizu, K and Tanimura, S.: A Sensing Block Method for Measuring Impact Force Generated at a Contact Part, *Int. J of Impact Engng*, Vol.19, No.2, pp.165-174, 1997.

4. Tanimura, S., Mimura, K. and Zhu, W. : A Dynamic Constitutive Equation and Its Experimental Verification, *Journal de Physique IV*, Vol.10, Pr9, pp.33-38, 2000.

5. 谷村眞治, 三村耕司, 榎田努: 広ひずみ速度域を対象とした各種材料グループに適用し得る実用構成式, 材料, 50-3, pp210-216, 2001.

6. 栗生直樹, 谷村眞治: 薄板鋼板の高速引張特性, 日本機械学会第2回機械材料・材料加工技術講演会講演論文集, No.940-36, pp144-145, 1994.

7. 三村耕司, 榎田努, 谷村眞治: 非共軸ホプキンソン棒衝撃引張試験法の測定精度評価, 日本機械学会平成12年度材料力学部門講演会講演論文集, No.00-19, pp 625-626, 2000.

8. Mimura, K., Hirai, K. and Tanimura, S. : Dynamic Tensile Behavior of Welded Parts in Automobiles, *Impact Engineering and Application* (ed. by A. Chiba & S. Tanimura), Elsevier, Vol. II, pp821-826, 2001.