

# 鋼構造材の動的強度 (高靱性材, 低靱性材および溶接部材)

谷村 眞治<sup>1</sup>・三村 耕司<sup>2</sup>・山田 哲<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大阪府立大学教授 工学部機械システム工学科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>2</sup>工博 大阪府立大学講師 工学部機械システム工学科 (〒599-8531 大阪府堺市学園町1-1)

<sup>3</sup>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 the real deformation and fracture processes of large scale steel structures due to a strong earthquake, destructive impact forces may act the important role. Each member of steel structures may be subjected to high speed deformation in the strain rate range of up to  $10^2\sim 10^3\text{s}^{-1}$ , especially at the tip of a propagating crack if collisions between members and localized deformation are taken into consideration. In the present paper, the dynamic properties of three kinds of SM490A based steels (one of the popular steels for building structures) which have different Charpy impact values, and those of welded steels are experimentally investigated in the wide range of strain rates from  $10^2$  to  $10^3\text{s}^{-1}$ , and their stress-strain relations, strain rate sensitivities and absorbed energies which may be associated with Charpy impact values are presented.

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

## 1. 緒言

実地震動による鋼構造物の変形・破壊過程では、衝撃的な負荷がかかる場合があり、想定されるひずみ速度も、部材間の衝突現象や局所の変形(亀裂先端の微小領域など)を考慮すると $10^2\sim 10^3\text{s}^{-1}$ のオーダーに及ぶものと推定される。このため、鋼構造物に使用されている材料の広範囲のひずみ速度域での力学的特性を把握することは、鋼構造物の変形・破壊過程を解明する上で必要不可欠となる。

本研究では、鋼構造物に一般的に使用されているSM490A材をベースとして、これを調質して作られた靱性値の異なる3種類の鋼種(SM490 A-A,B,C(高々靱性, 高靱性~低靱性材))の、準静的負荷からひずみ速度 $10^3\text{s}^{-1}$ の高ひずみ速度域に及ぶ広範囲での応力-ひずみ関係について検討した。また、これらの材料の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、一般構造用鋼を用いて、その母材と溶接部の動特性についての評価を行った。

## 2. 高々靱性, 高靱性および低靱性材料の動的強度

### (1) 試験材料 (SM490A-A, B, C材)

本研究で使用した試験材料は、基本的に構造用鋼材として多用されているSM490A材をベースとしたものであるが、添加物及び熱処理によってシャルピー衝撃試験値が異なるSM490A-A, SM490A-B及びSM490A-C材の3種類である。それぞれの鋼種に添付の機械的性質の一覧を表-1に示す。

表-1 試験材料の力学的特性

試験材料	降伏応力 (MPa)	引張強さ (MPa)	シャルピー 試験値(J) at 0°C
A	345	519	219
B	351	545	155
C	321	561	39

### (2) 試験装置および試験片

#### a) 試験装置

試験は全て引張試験とし、試験装置には検力ブロック式高速材料試験システム(鷲宮製作所製, TS-2000)を用いた<sup>1)</sup>。本試験機では検力ブロック式の動荷重検出法<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>を採用しており、長時間の荷重パルスを応力波の反射・干渉の影響を排して精度良く検出できる特徴がある。

#### b) 試験片

SM490A-A材については、図-1(a)に示すような平行部長さ3.8mm, 厚さ1.0mmの板状試験片を、幅250mm, 長さ350mm, 厚さ25mmのブロックから、圧延方向が引張方向に一致するように切り出し試験に供した。一方、SM490A-B及びC材については、図-1(b)に示す平行部長さ4mm, 直径3mmの丸棒試験片を幅250mm, 長さ50mm, 厚さ25mmの厚板鋼板のブロックから、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。なお、本報におけるSM490A-B材, SM490A-C材は、前報<sup>1)</sup>においてSM490B, SM490C材として記述されているもの同一の材料であり、前報との統一を図るため、本報でもこれらを「高靱性材」および「低靱性材」として扱う。ま

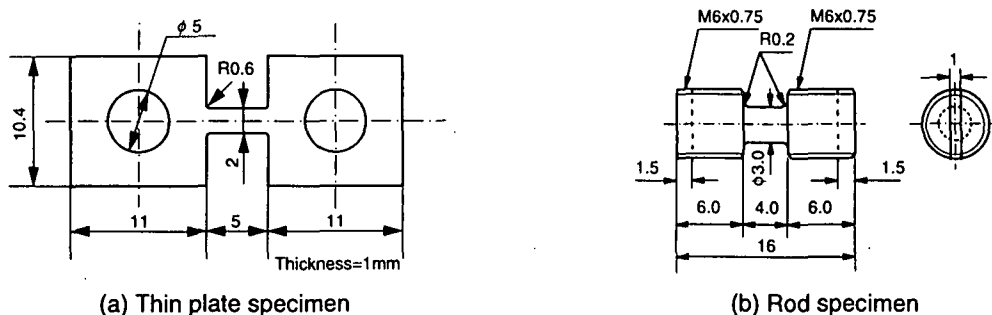


図-1 動的引張試験用試験片

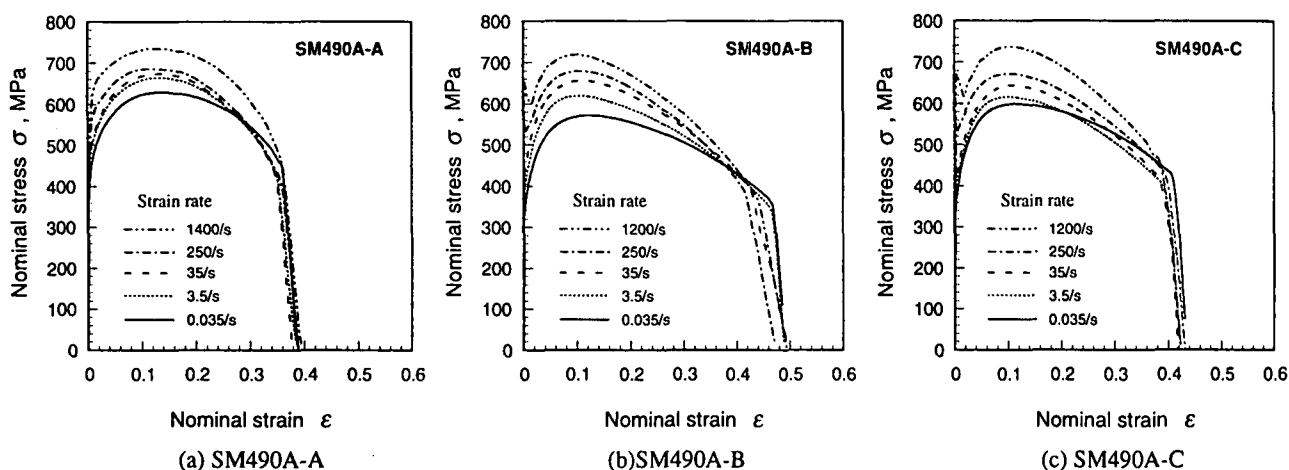


図-2 種々のひずみ速度におけるSM490A-A, B, C材の公称応力-公称ひずみ線図

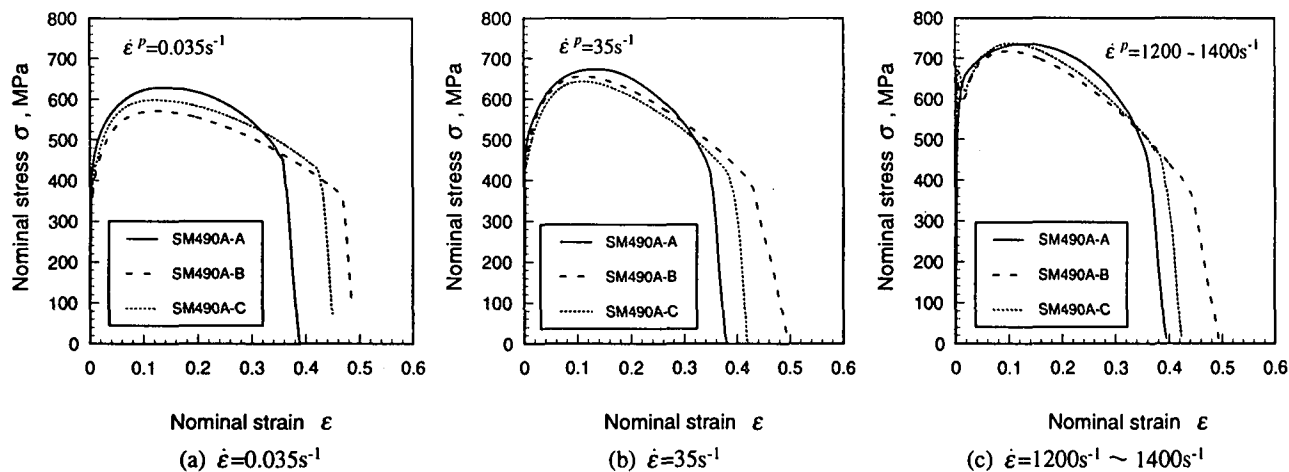


図-3 ひずみ速度  $0.035s^{-1}$ ,  $35s^{-1}$ ,  $1200-1400s^{-1}$  におけるSM490A-A, B, C材の公称応力-公称ひずみ線図の比較

た、SM490A-A材については、SM490A-B材に比べ、シャルピー衝撃試験値がかなり高くなっているため、これを「高々靱性鋼」として扱うこととする。

### (3) 試験結果ならびに考察

3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た。得られた破断までの公称応力-公称ひずみ曲線を図-2(a)(b)(c)に、また、比較を容易にするために、3種類の代表ひずみ速度  $0.035s^{-1}$ ,  $35s^{-1}$ ,  $1200 \sim 1400s^{-1}$ におけるA, B, C材の公称応力-公称ひずみ線図の比較を図-3(a)(b)(c)に示した。なお、A材のみ最高ひずみ速度が  $1400s^{-1}$  となり、B, C材の  $1200s^{-1}$  とは異なっているが、比較の上ではほぼ同じひずみ速度として扱うことにした。

なお、本研究では、破断までの大変形域を研究対象としたため、降伏点近傍の小ひずみ域の応力-ひずみ関係の測定精度は十分とは言えないことを予めことわっておく。

図-2および図-3より、破断ひずみはB(高靱性)材が最も大きく、およそ0.45~0.48の値をとり、A(高々靱性)材、C(低靱性)材ではそれよりも小さく0.4程度の値となった。しかし、A材とB, C材では試験片形状が異なるため、A材の延性がB, C材に比べ小さいとは断定できない。(板状試験片では、幅方向の寸法が、厚さ方向の寸法の2倍程度であるため、厚さ方向のくびれが優先的に起こり、結果として破断ひずみが小さく評価された可能性がある。)このため、本報ではB(高靱性)材の延性がC(低靱性)材に比べ大きいことのみを報告してお

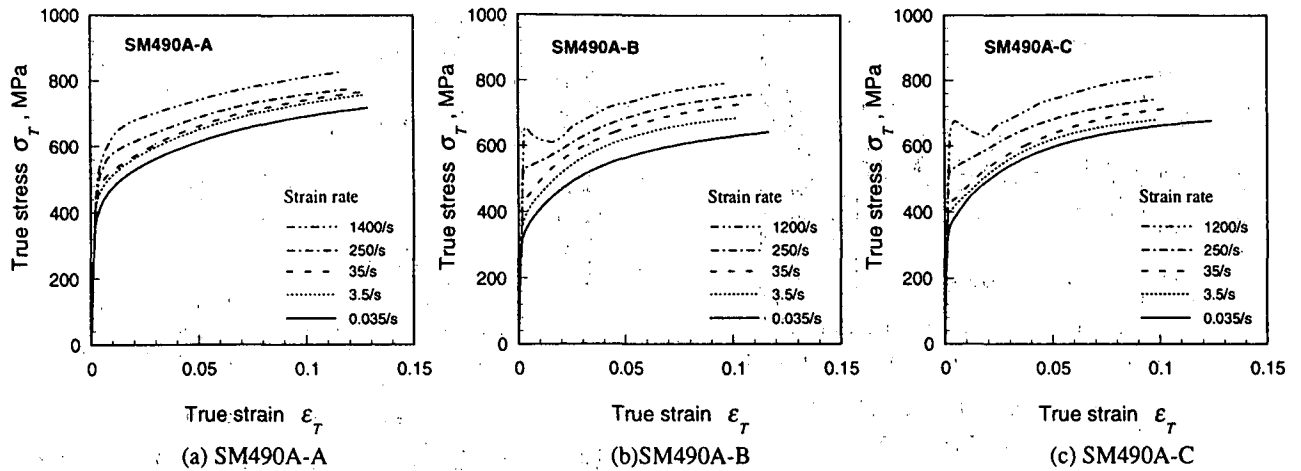


図-4 種々のひずみ速度におけるSM490A-A, B, C材の真応力-真ひずみ線図

く。一方、流動応力については、準静的変形時(ひずみ速度0.035s<sup>-1</sup>)では、A(高々靱性)材がもっとも大きな値を示し、ついでC(低靱性)材、B(高靱性)材の順となった。A材については、表-1によると、引張強さが3鋼種の中で最も小さく519MPaとなっているが、高速材料試験システムに加え、小試験片用の専用引張治具を用いた油圧式万能試験機(島津製作所製、REH-30)による検証試験の結果でも、測定された引張強さは600MPa程度と519MPaに比べかなり高い値を示している。また、ひずみ速度3.5s<sup>-1</sup>~250s<sup>-1</sup>のひずみ速度域では、応力の大きさは、A(高々靱性)材が最も大きく、次いでB(高靱性)材、C(低靱性)材の順になり、B(高靱性)材の応力がC(低靱性)材のそれを若干上回って逆転現象が見られた。しかしながら、このような3鋼種における動的強度の差は、ひずみ速度の上昇とともに小さくなる傾向があり(図-3参照)、ひずみ速度が10<sup>3</sup>のオーダーに達すると、3鋼種ともほぼ同一の応力レベルと見なせる程度になる。

引張強さ以降の公称応力-公称ひずみ関係は、前述のように試験片の寸法と形状の影響をうけるが、それ以前の挙動は直接の比較が可能と考えられる。図-4は引張強さまでのA, B, C材の真応力-真ひずみ関係を示したものである。引張強さに対応するひずみは、不安定変形(くびれ)の発生に対する指標の1つとなるが、図より、この値はA材が最も大きく、準静的変形の場合を除けば、概ね0.12~0.13程度、B材およびC材では、これより若干小さく0.10近辺の値を採っている。ただしB材とC材の間には、シャルピー衝撃試験値に見られるほどの顕著な差異(B材:155J, C材:39J)は認められなかった。

次に、3鋼種のひずみ速度依存性について検討する。図-5はSM490A-A, B, C材のひずみ速度依存性を、引張強さに至るまでの幾つか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<sup>4), 5)</sup>

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

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

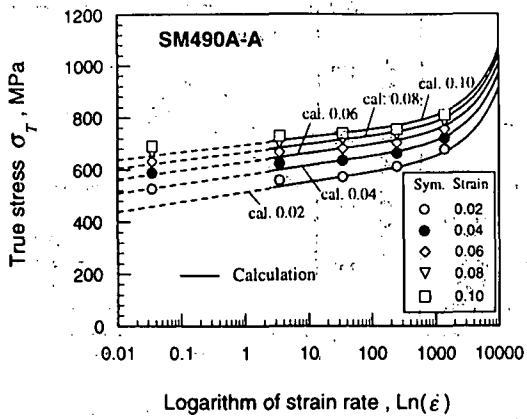
に基づく計算結果である。ここで、上式中の $\alpha, \beta, \sigma_{CR}$ の

値は、鋼材に対する定数値<sup>4), 5)</sup>  $\alpha = 19.6 \text{ MPa}$ ,  $\beta = -45.6 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_{CR} = 4.7 \text{ GPa}$ を用いた。また係数 $B, m$ については、 $B = 0.03 \text{ MPa}$ ,  $m = 1.0$ を選んだ。

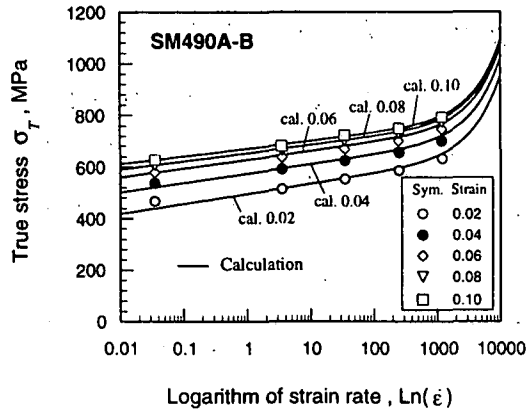
SM490A-B(高靱性)材については、計算結果と実験結果は、ひずみ速度0.035s<sup>-1</sup>~1200s<sup>-1</sup>の領域全体でかなり良い一致を示すことがわかる。一方、A(高々靱性)材およびC(低靱性)材では、ひずみ速度0.035s<sup>-1</sup>から3.5s<sup>-1</sup>までの領域における流動応力の増加が顕著ではなく、この領域で計算結果は実験結果を下回る結果となった。ただし、ひずみ速度35s<sup>-1</sup>以上の領域では、計算結果と実験結果は比較的良好一致を見ることがわかる。

また、図-6は、A, B, C材のひずみ速度依存性を静・動比(静的応力に対する動的応力の比率)を用いて比較したものであるが、これに依れば、B(高靱性)材のひずみ速度依存性が最も顕著であり、とくに35s<sup>-1</sup>以下の低ひずみ速度域ではA, C材の2倍以上高いことわかる。また、A(高々靱性)材とC(低靱性)材のひずみ速度依存性はほぼ同程度と見なせるが、詳細にはA材とC材のひずみ速度依存性は、ひずみ速度100s<sup>-1</sup>付近で入れ替わり、このひずみ速度以下ではA材がC材を若干上回り、また、これ以上のひずみ速度では、逆にC材がA材のひずみ速度依存性を若干上回ることがわかる。このような、静的降伏強度が低い材料ほど高いひずみ速度依存性を示す傾向は、式(1)の構成式による予測と合致するものとなっている。なお、図-6ではひずみ量0.06における実験値のみを示したが、引張強さまでの全てのひずみ値で同様の傾向が見られることを付記しておく。

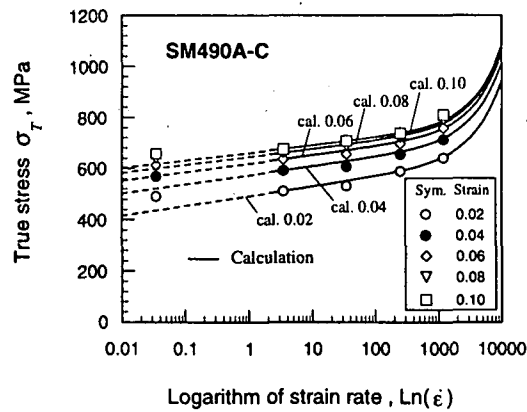
最後に、試験材のシャルピー衝撃試験値との関連が予想されるエネルギー吸収特性について検討する。図-7は、SM490A-A, B, C材の破断に至るまでの、試験片が吸収した単位体積あたりの塑性変形エネルギー( $E_v$ )をひずみ量を横軸として示したものである(ひずみ速度が高い場合、 $E_v$ は単位体積あたりの衝撃吸収エネルギーと称することもある)。図では例として、ひずみ速度0.035s<sup>-1</sup>と35s<sup>-1</sup>の場合を示した。いずれの試験ひずみ速度においても同一のひずみ量で比較すると、 $E_v$ はA(高々靱性)材が最も大きくなり、これはシャルピー衝撃値がA材において最も大きくなることと対応するように思われる。



(a) SM490A-A



(b) SM490A-B



(c) SM490A-C

図-5 SM490A-A, B, C材のひずみ速度依存性

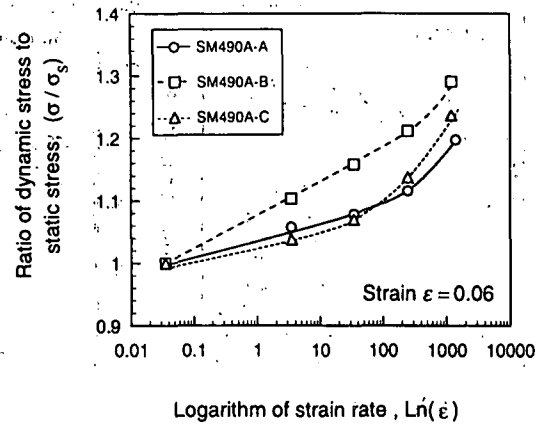


図-6 静動比によるSM490A-A, B, C材のひずみ速度依存性の比較

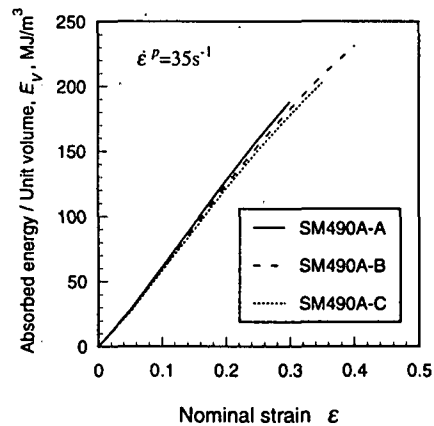
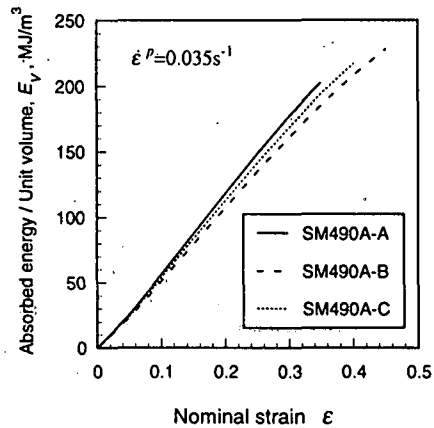


図-7 SM490A-A, B, C材のエネルギー吸収特性

一方、B（高靱性）材とC（低靱性）材に関しては、ひずみ速度によって、 $E_v$ の大小関係が入れ替わり、明確な傾向が見られない。また、3鋼種間の $E_v$ の差異はひずみ速度の上昇に伴って減少する傾向が見られた。これは高ひずみ速度になるほど3鋼種間の流動応力の差が小さくなることと対応している。

エネルギー吸収特性とシャルピー衝撃試験値との関係を明確にするため、図-8と図-9に、各材料の引張強さ及び破断強さまでに吸収した単位体積当たりの塑性変形エネルギーをそれぞれ示した。ここで、破断までの塑性変形エネルギーでは、応力-ひずみ関係の比較で既に述べたように、試験片の形状の違いからA材とB, C材との直接比較が出来ず、A材を除外して考える必要がある。

図-8によれば、試験ひずみ速度全域において、平均するとA（高々靱性）材のエネルギー吸収量は、B（高靱性）材、C（低靱性）材のそれをおよそ20%ほど上回ることがわかる。このエネルギー吸収量の増加は、A材のシャルピー衝撃試験値がB材のそれを上回る度合い（約40%）ほど大きなものではないが、A材の靱性が最も高くなることと良い対応を見せている。ただし、図-8からはB（高靱性）材とC（低靱性）材のシャルピー衝撃試験値の差異を説明することはできない。一方、図-9の破断までのエネルギー吸収量で比較するとB（高靱性）材のエネルギー吸収量はC（低靱性）材のそれを上回る結果となり、ひずみ速度 $100s^{-1}$ 以下の領域では、平均で10%ほど大きい。これは、主としてB（高靱性）材の破

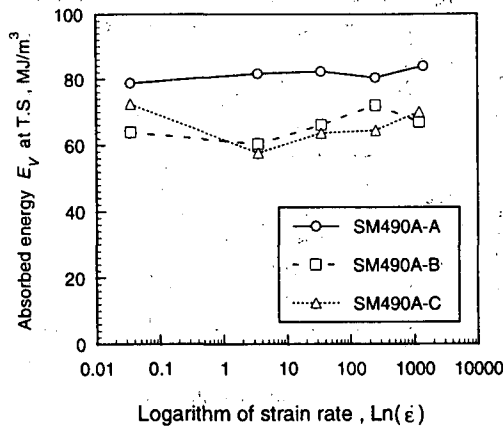


図-8 引張強さにおけるエネルギー吸収特性

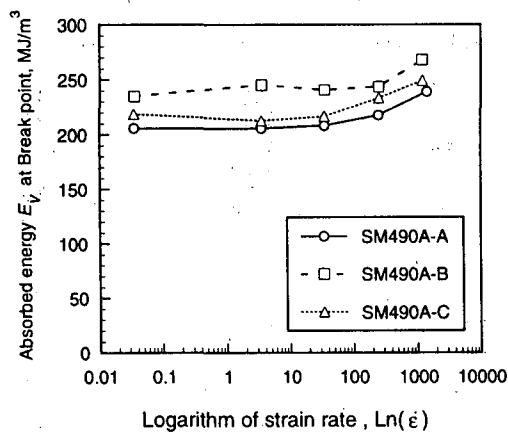


図-9 破断点におけるエネルギー吸収特性

断ひずみが、C (低靱性) 材のそれよりも大きいことに起因するものと考えられる。このエネルギー吸収量の差は、B、C材のシャルピー衝撃試験値の差 (それぞれ155Jと39J)ほど極端なものではないが、何らかの形で、これらの材料の靱性の差異と関連があるものと予想される。

### 3. 溶接部材の動的変形特性

構造物や機械の組立においては、溶接が多用される。したがって、このような溶接部位に衝撃的な荷重が加わった場合の変形挙動を明らかにすることは、実用および学術的な見地からみて重要である。本章では、270MPa級の一般構造用鋼板を例として、その母材と溶接部の動的強度、ならびに、溶接部の周辺の熱影響部を含めた領域の動的強度について検討する。

#### (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衝撃引張試験機<sup>1), 6)</sup>を使用した。本試験法の測定精度については文献<sup>7)</sup>を参照されたい。また、一部の試験については、前章で述べた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級の一般構造用鋼板を用い、母材のままの試験片 (以後、非溶接試験片と呼ぶ) ならびにレーザー溶接された試験片 (以後、溶接試験片と呼ぶ) の2種類について検討した。図-10に溶接試験片の例を示す。図中のハッチングされた領域は溶接時の溶融部を示し、本研究のレーザー溶接場合、こ

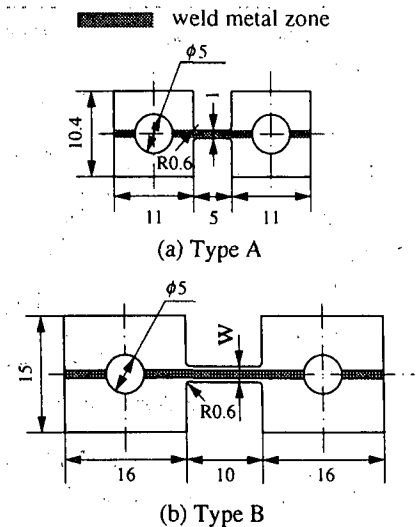


図-10 破断点におけるエネルギー吸収特性

の幅は1.0mm~1.5mm程度となる。Type A (平行部長さ3.8mm)の試験片は検力ブロック式高速材料試験システムで使用し、また、Type B (平行部長さ8.8mm)の試験片は非共軸ホプキンソン棒衝撃引張試験機で用いた。また、Type Bの試験片図中の平行部の幅Wは、溶接部の動的強度に加え、溶接周辺部を含めた強度の動的強度を併せて評価するため、1mm、2mm及び3mmの3種類とした。(このとき、つかみ部の寸法も平行部の変形に耐えるよう変更を行った)。なお、非溶接試験片については、溶接部の有無を除いて、基本的に溶接試験片と同一の形状のものを採用した。

#### (2) 試験結果および考察

図-11に、種々のひずみ速度における270MPa級鋼の母材の公称応力-公称ひずみ関係を示す。図より、ひずみ速度の上昇に伴って、変形開始後の加工硬化度はかなり減少することがわかる。母材のひずみ速度依存性は顕著で、準静的ひずみ速度 ( $0.005s^{-1}$ ) とひずみ速度  $1200s^{-1}$  における比較では、動的応力はひずみ量0.02で準静的応力の約1.9倍、また、ひずみ量0.05では約1.65倍に達している。また、ひずみ量の増加につれてひずみ速度依存性が低下する傾向は、鋼材に特有の性質で、前述のひずみ速度の上昇に伴う加工硬化度の減少と関連づけられる。図-12は、レーザー溶接・溶融部の公称応力-公称ひずみ関係を示したもので、いずれのひずみ速度においても、その流動応力は、図-11に示した母材のそれを大幅に上回っており、準静的ひずみ速度で2倍強、ひずみ速度  $1200s^{-1}$  で1.5倍に達している。一方、そのひずみ速度依存性は母材のそれに比べて格段に小さく、ひずみ速度  $1200s^{-1}$  の動的応力は、準静的応力の1.17倍、また、ひずみ量0.05では、1.16倍程度に留まっている。このような静的強度の高い材料のひずみ速度依存性が低下する傾向は、2章のSM490A材においても見られたが、溶接部においてはとくに顕著なものとなっている。

図-13は溶接部周辺の熱影響部を含めた部位の応力-ひずみ関係を示したものである。また、動的引張試験後の試験片形状を図-14に示した。試験片平行部幅1mm

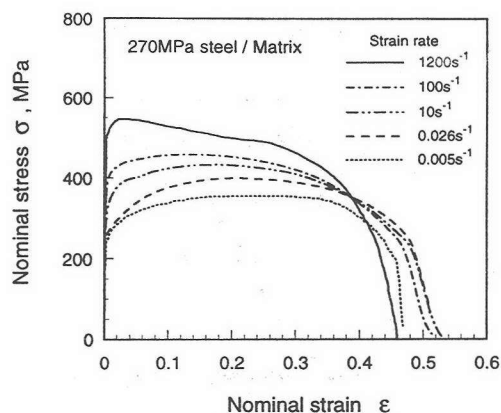


図-11 種々のひずみ速度における270MPa級鋼・母材の公称応力-公称ひずみ関係

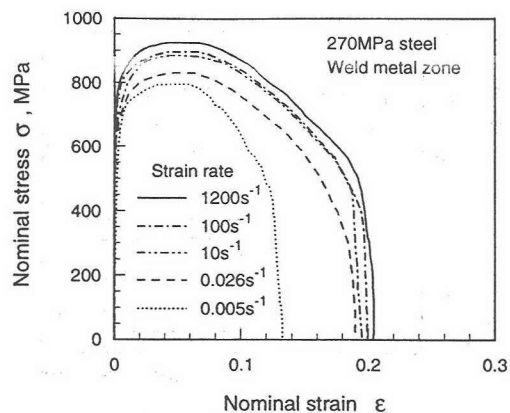


図-12 種々のひずみ速度における270MPa級鋼・溶接部の公称応力-公称ひずみ関係

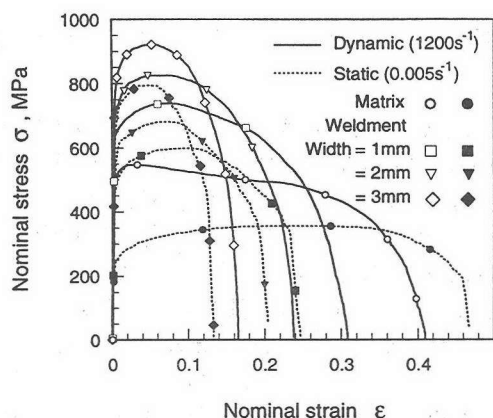


図-13 応力-ひずみ関係に及ぼす溶接試験片の平行部幅の影響

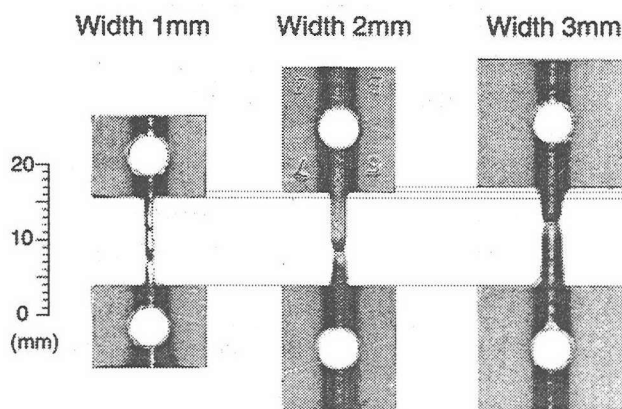


図-14 動的引張試験(ひずみ速度=1200s⁻¹)後の試験片形状(平行部幅の影響)

の場合には、平行部は完全に溶融部と見なせるが、平行部幅が大きくなると母材の熱変質相を含むことになる。図-13に示すように平行部幅の増加にともなって、動的応力、準静的応力とも低下し、平行部幅3mmの試験片での応力は1mmの場合に比べておよそ半分程度まで減少する。一方、破断伸びは図-14に示すように、平行部幅が大きくなるにつれて増加し、応力の場合とは逆に、平行部幅3mmでは、1mmの場合の伸びの約2倍程度となることがわかる。

#### 4. 結 言

靱性値の異なる3種類のSM490A材の動的強度について検討し、その応力-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、溶接部材のひずみ速度依存性、および溶接部周辺を含む場合の動的強度についても検討を行い有用な知見を得た。

謝辞：本研究の一部は、平成11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、謝意を表する。

#### 参考文献

1. 谷村真治, 三村耕司, 平井更之右: 広ひずみ速度域における鋼構造物の強度のひずみ速度依存性, 第1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, pp81-86, 2000.
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. 谷村真治, 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, (2001年3月掲載予定)
6. 栗生直樹, 谷村真治: 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, 谷村真治: 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, pp625-626, 2000.