

広ひずみ速度域における鋼構造材の強度の ひずみ速度依存性

○谷村 眞治¹・三村 耕司²・平井 更之右³

¹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)

²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)

³ダイハツ工業 (株) 材料技術部 (〒520-2593 滋賀県蒲生郡竜王町大字山之上 3000 番地)

To study the dynamic behavior of large scale steel structures due to a strong earthquake and to analyze a fracture initiation and propagation, it is important to know the rate dependence of the material properties covering wide ranges of strain rates of $10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ and strain. A practical constitutive equation covering the wide ranges of strain rates and strain which can be used in the simulations of the dynamic behavior of structures and the fracture analysis of materials is introduced. Experiments were performed to obtain the rate dependence of tensile stress-strain curves of high and low toughness steels and of welding elements of steels. The obtained results are presented.

Key Words: strength of material, constitutive equation, dynamic response, strain rate sensitivity, high and low toughness steels, strength of welding element

1. 緒言

実地震動による大型鋼構造物の破壊過程を解明するためには、その実地震動により鋼構造物に動的変形や動的破壊が生じるときのひずみ速度域をカバーした、鋼材の動特性を明らかにすることが重要な課程の一つとなる。また、破壊やき裂の進展過程を解析することも重要な課程の一つとなる。このためには、準静的変形域から 10^3 s^{-1} のオーダーの高ひずみ速度域をカバーした鋼材の動特性を合理的にモデル化した構成式を用いることが重要となる。

各種材料強度のひずみ速度依存性については、古くから多数の研究がなされている^{1)~5)}。そこで、まず、それらの中から本研究と関係の深い鋼材の強度のひずみ速度依存性に関する結果の主要な一部を紹介し、考察を加える。続いて、鋼構造物の動特性を調べるために高靱性材と低靱性材を選び、これらの材料に対して、準静的変形域から 10^3 s^{-1} のオーダーの高ひずみ速度までの各種ひずみ速度で引張試験を行った結果について述べる。また、一部溶接部(材)の動特性について、高ひずみ速度での引張試験を行って調べたので、これらの結果について述べる。

2. 広ひずみ速度域に適応し得る实用構成式

(1) 实用構成式の概要

ここでは、部材の動的変形挙動や破壊の解析や数値シミュレーションに必要な精度の良い实用構成式につ

いて説明する。2章の以下の説明では、断わりのない限り材料は初期等方的であり、後続の降伏は Mises の条件を満足するものとする。応力およびひずみは真応力、真ひずみを指すものとし、また、上添字 (p) はその量が非弾性変形と関連づけられることを示す。

任意のひずみ速度での動的降伏応力 σ を記述する構成式の1つとして次式がある⁶⁾。

$$\sigma = \sigma_s + C \ln(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_s^p) + B(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_u)^m \quad (1)$$

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

ここで、 σ_s : 準静的流動応力、 $\dot{\epsilon}_s^p$: 準静的ひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_u$: 単位ひずみ速度 ($=1 \text{ s}^{-1}$)、 C : 熱活性化領域における変形抵抗—ひずみ速度の対数線図の接線係数、 B および m は材料定数である。式(1)右辺第3項はひずみ速度が約 10^4 s^{-1} のオーダー以上でのひずみ速度依存性の記述のために導入されている。

式(1)中の C は、多くの構成式では、材料ごとの定数として扱われているが、現実には明らかなひずみ量依存性があり、bcc 金属の代表格である鉄鋼系の材料ではひずみ量の増加と共に C は減少する傾向がある⁷⁾。また、著者らの検討では、材料の静的強度とも密接な関係を持つことがわかっている。

ここで、 C の代わりに、無次元化された接線係数 \bar{C} ;

$$\bar{C} = C / \sigma_s \quad (2)$$

を導入する。著者らは、この \bar{C} が、同じ材料グループに属する金属については、その静的な強度に対して反

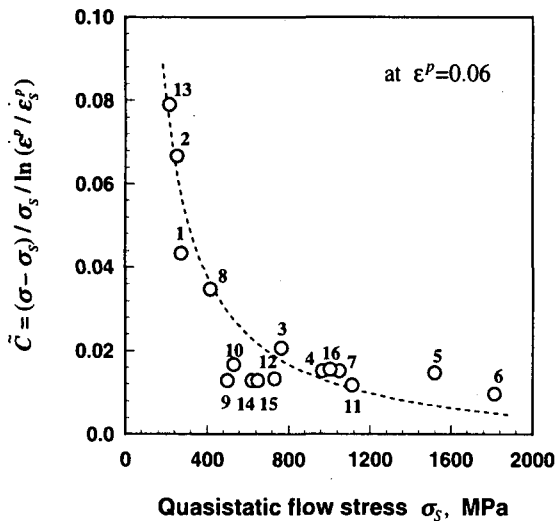


図-1 無次元化接線係数 \bar{C} の準静的降伏応力に対する依存性

図中のデータ番号は(1)軟鋼(2)アラムコ鉄(3)X45CrSi92合金鋼(4)低合金鋼(5)タングステン合金(6)S7工具鋼(7)7U25Mo合金(8)ANSIステンレス(9)(10)S25c(11)Inco718(12)9%ニッケル合金(13)純鉄(14)A533B鋼(15)ベイナイト鋼(16)6%Ti4%Al-V合金を表す。

比例して減少することを報告した⁷⁾。その一例をここに示す。図-1は内外の他の研究をもとに著者らが整理した、鉄鋼材料における \bar{C} と静的降伏強度の関係を示したものである。(なお、ここでのデータには、客観性を考慮して、本研究室で得られた実験結果は含めていない)。図中の破線は最小自剰近似で得られた双曲線であるが、実験点をよく近似していることがわかる。転位論によれば、金属の強度はその臨界せん断応力 τ_{CR} を上限とするので、動的変形時の応力上昇も τ_{CR} を上限とすると考えて良い。このことは、静的強度が τ_{CR} に達したとすれば、そのときの \bar{C} は逆に0となることを意味している。このことから、図-1に示した無次元化接線係数 \bar{C} と静的降伏応力 σ_s を関連づける式として、

$$\bar{C} = K(\epsilon^p) \left(\frac{1}{\sigma_s} - \frac{1}{\sigma_{CR}} \right) \quad (3)$$

を仮定できる⁷⁾。ここで、 $K(\epsilon^p)$ は \bar{C} のひずみ量依存性を表す関数、 $\sigma_{CR} = \sqrt{3}\tau_{CR}$ は単軸変形における限界強度で、鉄鋼の場合はおおよそ4.0GPa~6.0GPa程度と見積って良い。次に、式(3)中の関数 $K(\epsilon^p)$ について検討する。図-2は本研究室で行った実験結果をもとに鉄鋼系材料における \bar{C} と静的強度の関係を整理した結果である。図中の実線は、式(3)にしたがって、 K の値を最小自剰近似したもので、 \bar{C} は σ_s と双曲関係を示すことがわかる。同定された σ_{CR} の値は、鉄鋼については4.0GPaとなる。また、得られた K とひずみ量の関係を図-3に示した。図-3によれば、 ϵ^p と K

表-1 各材料グループに対する同定パラメタ

結晶構造	Bcc	Fcc	Hcp
材料グループ	鉄鋼	アルミ系	チタン系
α	-45.6MPa	5.50MPa	17.5MPa
β	19.5MPa	1.19MPa	13.2MPa
σ_{CR}	4.0GPa	1.5GPa	2.5GPa

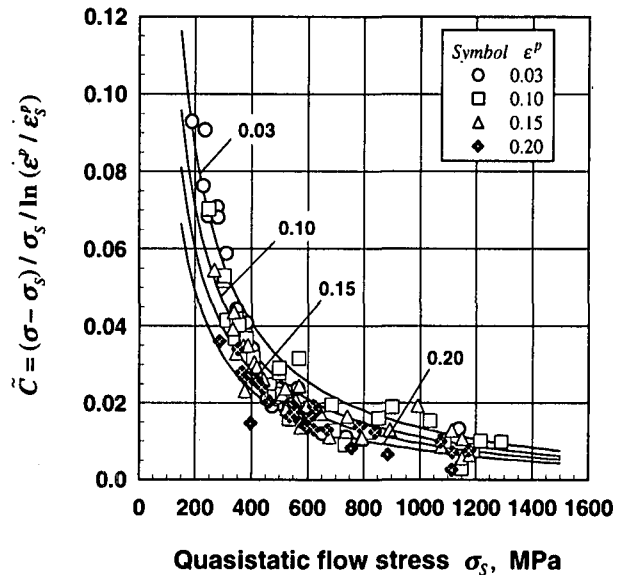


図-2 無次元化接線係数 \bar{C} と準静的降伏応力との関係(鉄鋼)

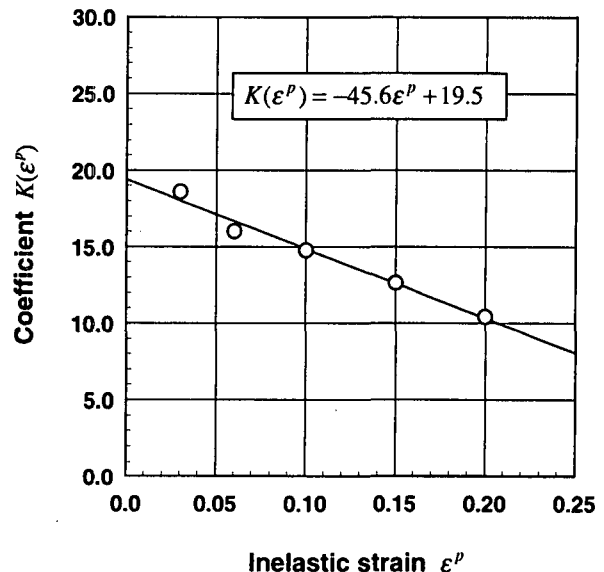


図-3 ひずみに対する係数 $K(\epsilon^p)$ の線形依存性(鉄鋼)

値の関係は、おおむね線形関係を示している。このことから、式(3)の具体形を、

$$\bar{C} = (\alpha\epsilon^p + \beta) \left(\frac{1}{\sigma_s} - \frac{1}{\sigma_{CR}} \right) \quad (4)$$

とおく⁷⁾。ここで、 α, β は、ここで考えた材料グループ内(すなわち鉄鋼)の全ての金属に対して普遍的に

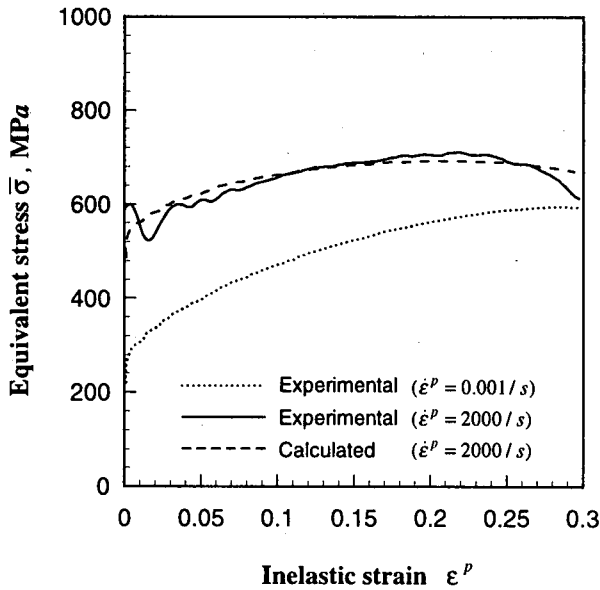


図-4 フェライト単相鋼の応力-ひずみ曲線

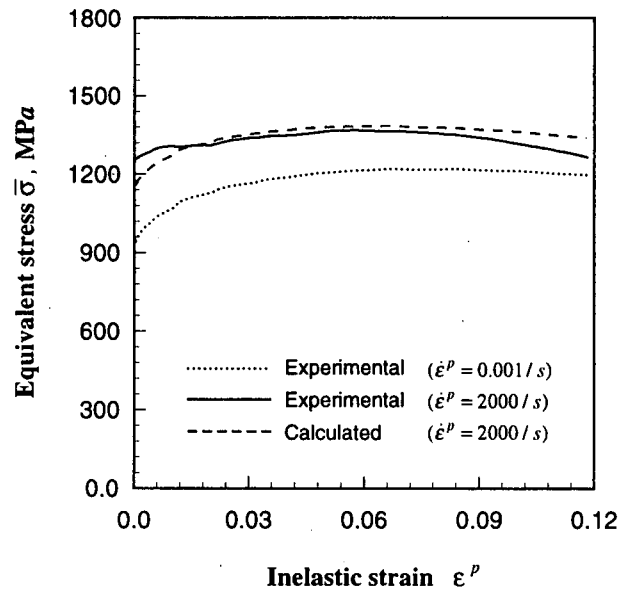


図-5 フェライト単相鋼の応力-ひずみ曲線

適用される材料定数であり、個々の材料に対するものではない。同定された定数 α, β の値を σ_{CR} の値とともに表-1に示した。表中には、アルミニウム系材料、および、チタニウム系材料に対する結果を合わせて載せている。式(1)に式(2)の関係を用いて式(4)を代入すれば、最終的な構成式の形として、

$$\sigma = \sigma_s + (\alpha \varepsilon^p + \beta) \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{CR}} \right) \ln(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_s^p) + B(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_u)^m \quad (5)$$

$\dot{\varepsilon}_s^p \leq \dot{\varepsilon}^p \leq 10^4 \sim 10^5 s^{-1}$ が得られる⁷⁾。ここで、前に述べたように、対象とするひずみ速度域を準静的ひずみ速度から $10^3 s^{-1}$ のオーダーのひずみ速度に限定するのであれば、上式の右辺第3項は省略しても良く、その場合、式(5)は

$$\sigma = \sigma_s + (\alpha \varepsilon^p + \beta) \left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_{CR}} \right) \ln(\dot{\varepsilon}^p / \dot{\varepsilon}_s^p) \quad (6)$$

のように簡略化することができる。これらの式を用いれば、対象とする材料が表-1のどの材料グループに属するかということと、その材料の準静的応力-ひずみ曲線のみが予め既知であれば、その材料の任意のひずみ速度での動的な応力-ひずみ曲線がモデル化できる。

(2) 構成式の実験的検証

本節では、得られた構成式の実験的検証として、いくつかの金属の応力-ひずみ関係に対して式(6)を適用し得られた計算結果と実験結果との比較例を示す。図-4に構造用フェライト単相鋼、また図-5に高強度材料のベイナイト鋼に対する構成式の適用例を示した。これらの図中の破線は式(6)に基づく計算結果を表し、式(6)に基づく計算結果は実験結果を

よく近似しており、筆者らの提案構成式の有効性が確認できる。

3. 構造用材料の動的変形挙動に関する検討

(1) 構造用高靱性および低靱性材料の動的引張試験

a) 試験装置

本節では、建造物や機械構造物に用いられる構造用部材の動的強度と変形挙動を明らかにする研究の一環として、検力ブロック式高速材料試験機(鷺宮製作所製, TS-2000)を用いたSM490ベースの高靱性材および低靱性材の動的引張試験の結果について報告する。本試験装置では検力ブロック式の新しい動荷重検出法⁸⁾を採用しており、後述のHopkinson棒法衝撃材料試験機に比べ、コンパクトでありながら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長所がある。また従来、材料の広いひずみ速度範囲の応力-ひずみ関係を求めるためには、対象とするひずみ速度によって数種類の試験装置を使用する必要があったのに対し、本試験機では、所定の寸法の試験片を用いた場合、およそ $10^{-2} \sim 10^3 s^{-1}$ またはそれ以上の範囲のひずみ速度における引張および圧縮試験を1台の試験機のみでカバーできる。また、同一の形状・寸法の試験片を用いることで、各ひずみ速度に対する試験結果の直接比較が容易であるなど、結果を解析する上で注目すべき長所も多い。本試験で用いた高速材料試験機(TS-2000)は図-6に概略を示すとおり、従来の動的負荷装置に比べかなりコンパクトな構成となっている。

b) 試験方法および試験片

本試験で使用した材料はSM490で、幅250mm、長さ50mm、厚さ25mmの厚板鋼板のブロックから圧延

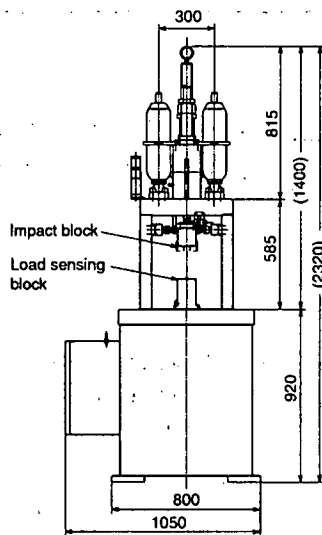


図-6 検力ブロック式高速材料試験機の概略

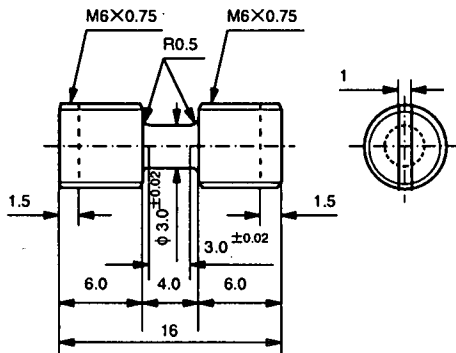


図-7 動的引張試験用丸棒試験片

方向 (=長さ方向) に軸線が沿うよう直径6mmの円柱を切り出し、さらに図-7に示すような形状の丸棒試験片に加工して使用した。試験ひずみ速度は 0.035 s^{-1} 、 3.5 s^{-1} 、 35 s^{-1} 、 250 s^{-1} 、 1200 s^{-1} の5種類を選んだ。
c) 試験結果ならびに考察

図-8に高靱性鋼(SM490A)、図-9に低靱性鋼(SM490B)のそれぞれ公称応力-公称ひずみ関係を示す。また、図-10にはひずみ速度 0.035 s^{-1} 、 35 s^{-1} 、 1200 s^{-1} における両材料の応力-ひずみ関係の比較を示した。これらの結果から、高靱性鋼は低靱性鋼に比べておよそ15%程度(ひずみ量で約0.1程度)破断伸びが大きくなることわかる。また、高靱性鋼では、低靱性鋼より若干、準静的降伏応力が小さい。両材料の流動応力のひずみ速度依存性を明らかにするために、最大荷重点での応力(引張強さ)とひずみ速度の関係を整理したものを図-11に示した。高靱性鋼では、流動応力はひずみ速度の対数に線形に増加しているのに対し、低靱性鋼では、ひずみ速度 10^2 s^{-1} 付近を境にして、図中の曲線の傾きは変化し、 10^2 s^{-1} 以下でのひずみ速度依存性は若干小さくなっている。

このような、中間速度域でのひずみ速度依存性につ

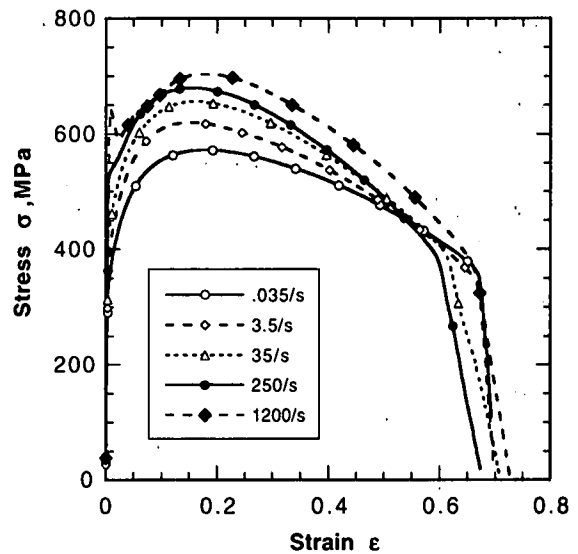


図-8 種々のひずみ速度における高靱性鋼(SM490A)の応力-ひずみ関係

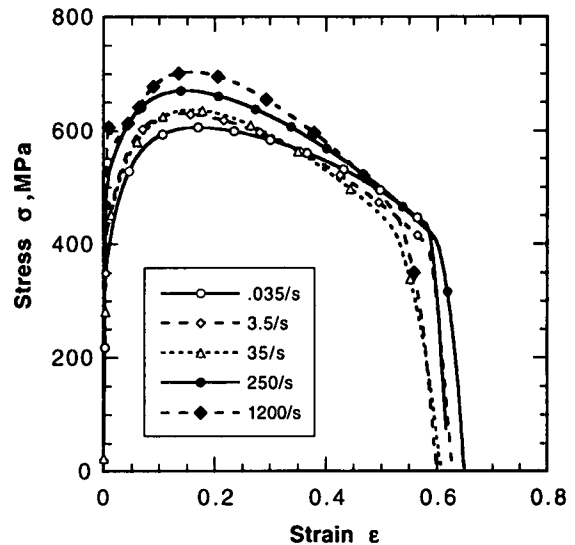


図-9 種々のひずみ速度における低靱性鋼 (SM490B)の応力-ひずみ関係

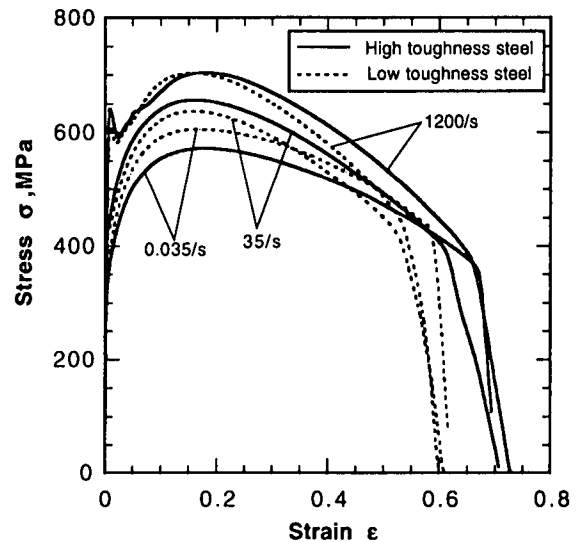


図-10 ひずみ速度 0.035 s^{-1} 、 35 s^{-1} 、 1200 s^{-1} における高靱性鋼および低靱性鋼の応力-ひずみ曲線の比較

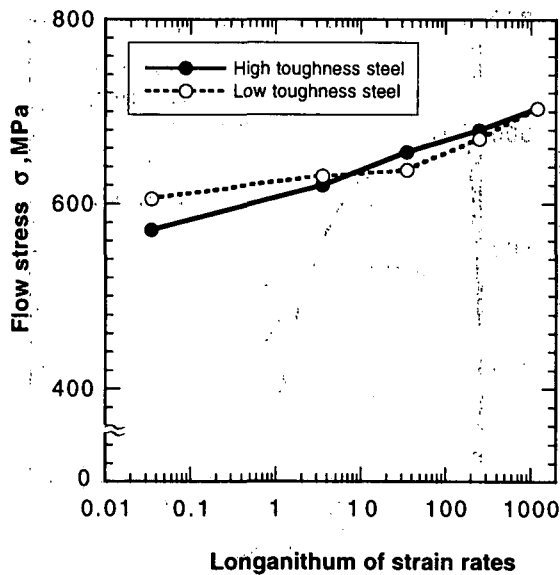


図-1 1 高靱性鋼および低靱性鋼の最大荷重点の応力のひずみ速度依存性

いての差異はあるものの、本実験に用いた高靱性鋼と低靱性鋼のひずみ速度依存性の度合いはおおむね等しいと考えてよい。また、2章で示した実用構成式を本試験のひずみ速度 1200 s^{-1} での結果に適用したところ、最大応力の大きさについては計算値と実験値はおおよそ一致することがわかった。

(2) 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学術的見地のみならず実用的な見地からみても重要である。本節では、溶接部を含む薄板試験片を用いた動的引張試験の結果の一部について述べる。

a) 試験機および試験方法

溶接試験片の引張試験には、図-12に示すような非共軸型ホプキンソン棒法衝撃試験機⁹⁾を使用した。本試験機では通常のホプキンソン棒法とは異なり、2本の応力棒は段違いに配置されている。応力棒の先端には直径5mmのピン型の突起が設けてあり、同径の穴をもった試験片との接合に用いられる。試験片を応力棒間に設置し、通常のホプキンソン棒法と同様に打撃棒(黄銅製、長さ500mm)を用いて入力棒に衝撃を加えると、試験片には衝撃的な引張力が作用する。なお、非共軸型の配置によって応力棒、試験片に生じる曲げモーメントの影響については、入力パルス持続時間内の応力棒先端のたわみ量が十分に小さいため、無視できる。

b) 試験片

実験には、270MPa級の一般鋼板のレーザー溶接試験片を用いた。試験片の各部の寸法を図-13に示す。なお、溶接部位に作用する荷重の方向の影響を調べる

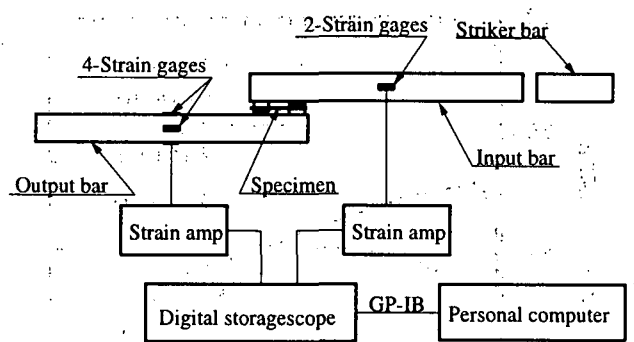
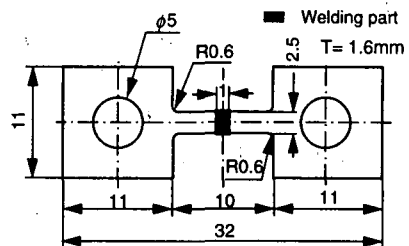
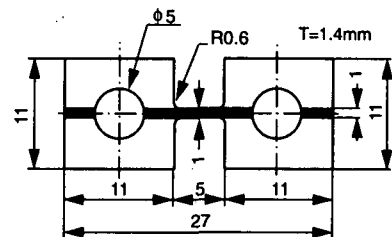


図-1 2 非共軸型ホプキンソン棒法衝撃試験機の概略



(1) Specimen A



(2) Specimen B

図-1 3 薄板溶接試験片

ため、図示のように試験片平行部の長手方向を溶接面に垂直とした試験片(試験片Aと呼ぶ)と水平とした試験片(試験片Bと呼ぶ)の2種類について検討した。

c) 試験結果および考察

図-14に溶接部を含まない試験片(各部寸法は試験片Aと同じ)の準静的ひずみ速度($\dot{\epsilon}=0.00047\text{ s}^{-1}$)および動的ひずみ速度($\dot{\epsilon}=1400\text{ s}^{-1}$)における公称応力-公称ひずみ曲線を、また、図-15と16に試験片Aと試験片Bに対する同様の結果を示した。図-14中の非溶接試験片の動的な応力-ひずみ曲線には破断点が表示されていないが、これは有効測定時間内に破断まで至らなかったためである。非溶接試験片(図-14)と試験片A(図-15)における準静的応力-ひずみ関係を比較すると、ひずみ量0.1程度まではおおよそ一致することがわかる。ただし、溶接した試験片Aでは、その後、くびれが発生して荷重が低下するため、引張強さは非溶接試験片に対するものより低くなった。一方、試験片B(図-16)では、準静的変形時の応力は格段に高くなり、非溶接試験片のその2倍近くにまで達している。ただし、伸びに関しては、試験片Aと試験片Bで顕著な差は認められない。

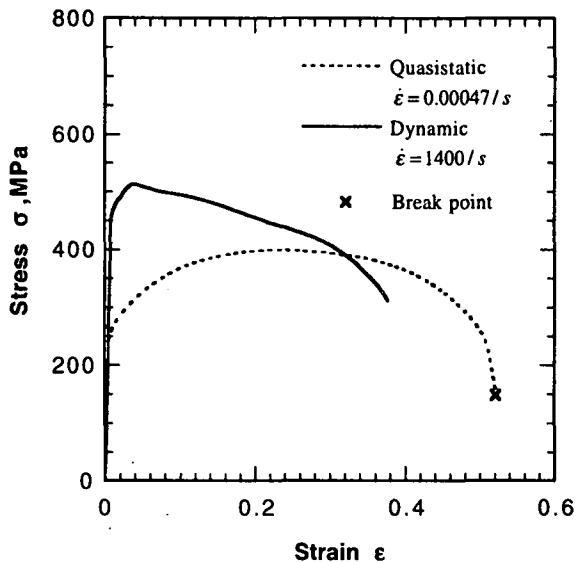


図-14 非溶接試験片の準静的及び動的応力-ひずみ曲線

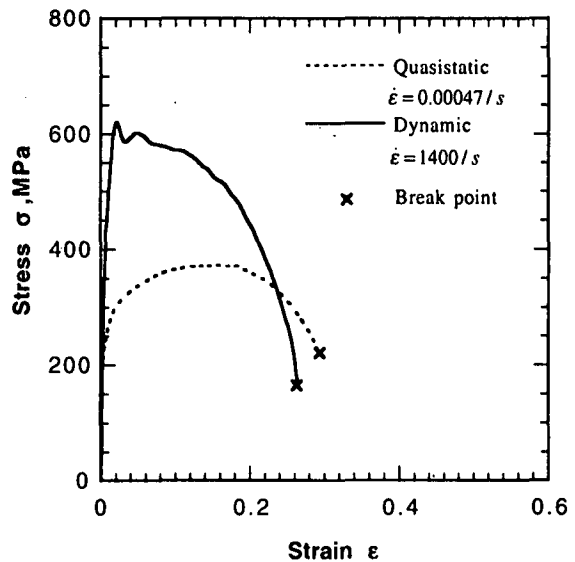


図-15 試験片 A (垂直)の準静的及び動的応力-ひずみ曲線

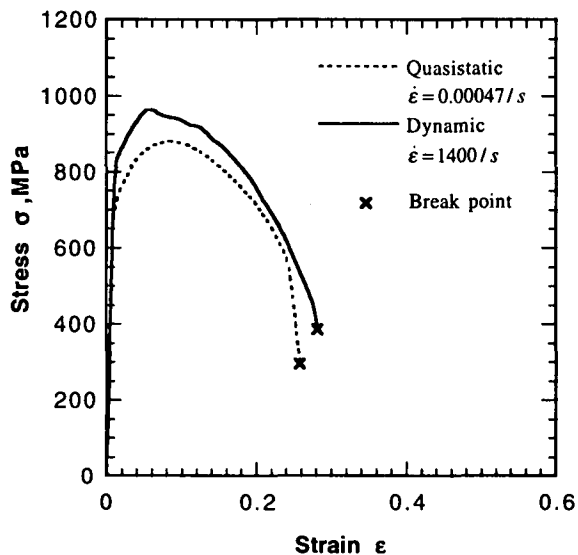


図-16 試験片 B (水平)の準静的及び動的応力-ひずみ曲線

ひずみ速度 1400s^{-1} の動的変形時の応力-ひずみ関係では、溶接部位に平行に引張った試験片 B の応力が最も高く（およそ 1000MPa ）、ついで溶接部位に垂直な方向に引張った試験片 A（ 600MPa 程度）、非溶接試験片（ 500MPa 強）の順になった。しかし、ひずみ速度依存性（または静動比）の観点からは、溶接部位に垂直に引張った試験片 A が、静動比が 2 倍近くに達し、最も大きなひずみ速度依存性を示していると言える（非溶接試験片の変形初期の静動比も同程度になるが、変形の進行とともに急速に低下する）。一方、試験片 B の静動比は、その準静的な応力値が極めて高いため、3 種類の試験片中、最も低いものとなった。この傾向は 2 章で示した、 \bar{C} と σ_s の関係に良く符合している。動的変形時と準静的変形時の伸びについては、試験片 A では準静的変形時の方が、また試験片 B では動的変形時の方が大きな伸びを示しているが、試験片 A、試験片 B とも顕著な差は認められなかった。

4. 結言

構造物や材料の動的変形および動的破壊の発生と進展の解析に重要な構成モデルについて説明し、本研究と関係の深い鋼材の強度のひずみ速度依存性に関する結果の主要な一部を紹介し、考察を加えた。また、鋼構造物の動特性の評価の観点から実施した高靱性材および低靱性材に関する引張試験と、溶接部材の引張試験の結果を示し、多数の有用な知見を得た。

今後、これらの研究を一層発展させ、幅広い構造材料の動特性を明らかにするとともに、それらにより構成モデルの表現精度を上げ、構造物の動的変形挙動と破壊過程の解明を進める必要がある。

5. 参考文献

1. 谷村真治：解説「材料の高速変形と構成式」, 日本金属学会会報, 29-5, pp.337-344, 1990.
2. 谷村真治：解説「材料の高速変形と破壊」, 材料, 40-452, pp.642-648, 1991.
3. 谷村真治：研究展望「材料・構造物の衝撃問題研究（これまでの推移と今後の展望）」, 機論, 63-616A, pp.2-7, 1997.
4. *Dynamic Plasticity and Structural Behaviors*, Ed. by Tanimura, S. and Khan, A.S., Gordon and Breach Pub., 1995
5. *Impact Response of Materials & Structures*, Proc. of 3rd ISIE, Ed. by Shim, V.P.W., Tanimura, S. and Lim, C.T., Oxford Univ. Press, 1998.
6. Tanimura, S.: *Proc. of Int. Symp. on Impact Engng.*, Vol. I, pp17-26, 1992.
7. Tanimura, S. and Mimura, K.: 文献 4 の pp17-216, 1995
8. Tanimura, S.: A New Method for Measuring Impulsive Force at Contact Parts, *Exp. Mech.*, 24-4, pp271-276, 1984
9. 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.