軟質継手の動的負荷による塑性変形に伴う温度上昇を考慮した 熱弾塑性応力・ひずみ解析*

—強度的不均質をもつ溶接継手の動的変形・破壊特性に関する研究 (第1報)—

望月 正人**, 安 圭栢***, 大村 剛****, 豊田 政男**

Thermal Elastic-Plastic Stress and Strain Analysis Considering Temperature Rise due to Plastic Deformation by Dynamic Loading in Undermatched Joint*

—Studies on Characteristics of Dynamic Deformation and Fracture in Welded Joint with Strength Heterogeneity (Report 1)—

by MOCHIZUKI Masahito**, AN Gyu-Baek***, OHMURA Takeshi**** and TOYODA Masao**

It is important to understand the characteristics of material strength and fracture under the dynamic loading like as earthquakes to assure the integrity of welded structures. The characteristics of dynamic strength and fracture in structural steels and their welded joints should be evaluated based on the effects of the strain rate and the service temperature. On the other hand, the temperature rises so rapidly in structures due to the plastic work done under the high strain rate, that the effect of the temperature cannot be negligible for the dynamic fracture. It is difficult to predict or measure temperature rise history with the corresponding stress-strain behavior. In particular, material behaviors beyond the uniform elongation can't be precisely evaluated, though the behavior at large strain region after the maximum loading point is much important for the evaluation of fracture. In this paper, the coupling phenomena of temperature and stress-strain fields under the dynamic loading was simulated by using the finite element method. The modified rate-temperature parameter was defined by accounting for the effect of temperature rise under the dynamic deformation, and it was applied to the fully-coupled analysis between heat conduction and thermal elastic-plastic behavior. Temperature rise and stress-strain behavior including complicated phenomena were studied beyond the maximum loading point in structural steels and their undermatched joints and compared with the measured values.

Key Words: Welded Joint, Undermatched Joint, Strength Heterogeneity, Dynamic Loading, Plastic Deformation, Temperature Rise, Thermal Elastic-Plastic Analysis

1. 緒 言

1994年に発生したノースリッジ地震や翌1995年の阪神・淡路大震災では、建築鉄骨構造物の一部に深刻な被害がもたらされた^{1,2)}。それらの中でも、数多くの被害が溶接継手のような接合部に見られたことから、地震のような比較的高速な負荷を溶接部が受けた場合における継手の信頼性を適切に評価し、設計や施工、補強に結びつけていくことが重要な技術課題となっている。

一般に、地震荷重のような動的負荷を構造用鋼が受ける

場合、静的荷重下とは異なった強度特性を示す。すなわち、ひずみ速度と雰囲気温度の影響によって、材料の強度および破壊特性は大きく変化する³⁻⁸⁾。具体的には、ひずみ速度の増大や雰囲気温度の低下によって、材料の強度は高くなり、また、破壊形態は延性側から脆性側へ移動する。一方、動的負荷時の高速変形のために生じた熱の散逸が十分に行われず、それが局所的な鋼材の温度の上昇をもたらす。結果として材料の機械的特性に影響を及ぼすことも指摘されている⁹⁻¹⁷⁾。すなわち、動的負荷を受ける材料の強度および破壊特性には、雰囲気温度のみならず高速な塑性変形に伴う破壊部近傍での温度上昇の影響が大きく依存するといことがこれまでの報告から明らかになっている。しかし、その破壊特性に及ぼす影響因子の定量的評価手法が必ずしも確立されたというわけではなく、詳細な数値解析を行うことによって破壊時の応力・ひずみ分布や温度上昇量を求めることなど種々の検討の余地が残されていると考えられる。また、溶接継手の動的強度・破壊特性について高速塑性変形に伴う温度上昇の影響を考慮した上で評価した例もほとんど見受けられないことから、強度不均質部を必

*原稿受付 平成12年9月12日 平成12年3月第143回溶接構造研究委員会で発表

**正 員 大阪大学大学院工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

***学 生 員 大阪大学大学院工学研究科 Student Member, Graduate School of Engineering, Osaka University

****正 員 大阪大学大学院工学研究科 (現:新日本製鐵株) Graduate School of Engineering, Osaka University (Presently, Nippon Steel Corporation)

Table 1 Chemical compositions of materials used.

Material	Chemical compositions (mass %)														
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ti	Nb	Al	B	C _{eq}
HT50	0.17	0.31	1.48	0.011	0.002	-	-	-	-	-	-	-	0.016	-	0.43
HT80	0.10	0.26	0.85	0.004	0.002	0.23	1.16	0.49	0.47	0.037	0.016	0.011	0.046	0.0012	0.50

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15, \quad P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

Table 2 Mechanical properties of materials used before and after heat treatment.

Material	Before heat treatment			After heat treatment					
	σ_{y0} (MPa)	σ_{T0} (MPa)	EL (%)	σ_{y0} (MPa)	σ_{T0} (MPa)	YR (%)	UEL (%)	EL (%)	RA (%)
HT50	344	516	33.4	298	522	57.0	14.1	30.8	68.0
HT80	717	800	20.8	537	737	72.9	6.6	20.2	64.0

σ_{y0} : Lower yield stress, σ_{T0} : Tensile strength, YR : Yield-to-tensile ratio (σ_{y0}/σ_{T0}), UEL : Uniform elongation, EL : Elongation (G.L.=40mm, Dia.=10mm), RA : Reduction of area

然的に有することの多い溶接継手に関する動的負荷を受ける場合の強度および破壊特性を、強度不均質と動的負荷の重量効果を考慮した上で評価できる手法を確立することも重要であるといえる。

本研究では、実際に熱影響部などの軟質部を含む場合の多い溶接継手を模擬した強度不均質継手について、地震荷重のような動的負荷を受けた場合の変形・強度および破壊特性を明らかにすることを目的とする。そのため、種々のひずみ速度と試験温度での機械的特性と高速の塑性変形に伴う温度上昇量を把握する必要があるが、対象となる材料の破壊時における応力・ひずみ分布や温度上昇量が破壊現象に大きく影響を及ぼすと考えられることから、材料の破壊に至るまでの挙動を評価することが重要になる。これらの現象を実験のみで把握することは、現象が高速であることや部材内部での挙動が直接的に観察できないことなど不都合な点が多い。そこで本報では、熱と応力の連成を考慮した大変形熱弾塑性解析を行うことによって動的負荷を受ける構造用鋼および軟質部を含む継手の破壊に至るまでの応力-ひずみ分布特性および高速塑性変形に伴う温度上昇挙動を求め、これらの解析結果を実験結果と比較することによって今回用いた解析手法の妥当性および解析精度について検討した。

2. 実験方法

まず、HT 50 鋼と HT 80 鋼およびその組み合わせからなる強度不均質継手を用いて引張試験を行った。すなわち、実際に熱影響部などの軟質部を含む場合の多い溶接継手を HT 50 鋼と HT 80 鋼の組み合わせで模擬した強度不均質継手を 1050 °C、30 分保持の条件で拡散接合により作

(a) Homogeneous specimen (HT 50 and HT 80 steels)

(b) Undermatched joint

(c) Relative thickness change of undermatched joint

Fig. 1 Configurations of round-bar tension specimens and definition of the relative thickness in an undermatched joint.

製した。また、動的負荷による機械的特性を把握するための均質材に関しても同じ条件の熱処理を行った。鋼材の化学組成を Table 1 に、継手作成時の拡散接合熱処理前後での静的機械的特性を Table 2 に示す。降伏応力および引張強さは拡散接合のための熱処理によりいずれも低下する傾向にあることがわかる。熱処理材から切り出した均質材お

Fig. 2 Schematic illustration of round-bar tension test.

よび軟質継手の試験片の形状と寸法を Fig. 1 に示す。ここで、軟質部の相対厚さ X を軟質部の厚さ H と試験片直径 D の比 $X=H/D$ とし¹⁸⁾、 $X=0.15, 0.3, 1.0$ と変化させることによって塑性拘束の大きさを変化させている。

また、引張試験はアクチュエータの変位速度 $0.01 \sim 200$ mm/s、試験温度 $-80^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ の範囲で実施した。引張試験の実施状況の概要図を Fig. 2 に示す。すなわち、試験機は自動制御型万能試験機、荷重はロードセル、変位はカンチレバー式のクリップゲージを用い、標点間距離を 40 mm として開口量のバランスをとるために試験片の両側から変位を測定した。また、温度上昇は試験片中央部の表面上に熱電対を直接取り付け測定した。なお、試験片の冷却は適量の液体窒素を冷却槽の中に注入し、試験片全体が均一の温度になっていると見なせるように 10 分間以上目標温度 $\pm 1^\circ\text{C}$ で保持した後に種々の変位速度による引張試験を行った。

3. 均質材料の機械的特性の把握

均質材料としての構造用鋼およびその組み合わせとして構成される軟質継手の動的負荷時における応力・ひずみ分布および温度上昇挙動を解析的に把握するためには、解析条件として種々の変位速度、雰囲気温度における各鋼材の機械的性質が必要となる。そこで本章では、実験によって得られた機械的特性の各条件下での結果を数値解析に用いることができるように整理することを試みた。

3.1 均質材料の機械的特性に及ぼす温度およびひずみ速度の影響

軟質継手を構成する二種類の均質材料と見なせる構造用鋼の機械的特性に及ぼすひずみ速度および温度の影響を検

Fig. 3 Examples of nominal stress-nominal strain curve obtained by round-bar tension tests on static and dynamic loadings.

(a) HT 50 steel

(b) HT 80 steel

Fig. 4 Effects of strain rate and temperature on yield stress and tensile strength.

討するために引張試験を行った。HT 50 鋼と HT 80 鋼の公称応力-公称ひずみ関係の一例を Fig. 3 に示す。図中には、室温における静的負荷時（変位速度：0.1 mm/s）および動的負荷時（変位速度：100 mm/s）の応力-ひずみ関係をそれぞれ示している。このような関係を種々の試験温度およびひずみ速度で得ることにより、均質材料の機械的特性として、降伏応力、引張強さ、一様伸び、破断伸び、絞りについて各材料ごとに整理した。ここで、公称ひずみは負荷時間に対してほぼ直線的に増加していることから、変形の大部分を占める塑性変形領域におけるクリップゲージによって測定した標点間距離 40 mm での公称ひずみの平均変化率として、ひずみ速度を計算することとした。

まず、HT 50 鋼と HT 80 鋼における降伏応力および引

張強さに及ぼすひずみ速度と試験温度の影響を Fig. 4 に示す。ここで、降伏応力は降伏点での値として整理している。両鋼材とも降伏応力、引張強さともにひずみ速度の増加もしくは試験温度の低下に伴い上昇する傾向がある。また、ひずみ速度に関しては $10^{-2}/s$ 以下の速度では降伏応力および引張強さはほぼ一定値になっており、その値によって静的条件下での値と見なすことができると考えられる。なお、降伏応力と引張強さの上昇傾向では降伏応力の方が大きいことから、ひずみ速度の増加と試験温度の低下によって材料の降伏比は大きくなるのがわかる。

Fig. 5 に両鋼材の一様伸び、破断伸びとひずみ速度および温度の関係を、Fig. 6 には絞りとひずみ速度および温度の関係を示す。両鋼材とも一様伸び、破断伸びおよび絞りについて今回の試験条件の範囲内ではひずみ速度の変化の影響を特に受けず、ほぼ一定の値をとっていることがわか

(a) HT 50 steel

(a) HT 50 steel

(b) HT 80 steel

(b) HT 80 steel

Fig. 5 Effects of strain rate and temperature on uniform elongation and elongation.

Fig. 6 Effects of strain rate and temperature on reduction in area.

る。また、試験温度の差について見ても、これらの特性は全体的に比較的大きなばらつきを有しているものの、その結果に特別な相関はなさそうであり、ほぼ一定の値と見なすことができると考えられる。

これらの結果から、今回用いた二種類の材料については、強度特性に関してはひずみ速度の増大および試験温度の低下に伴い上昇するが、延性に関してはひずみ速度および温度の影響をほとんど受けないことがわかった。また、二種類の鋼材の破壊様式は、今回の試験条件の範囲内ではすべての変位速度、試験温度の条件下においていずれもカップアンドコーンを呈する延性破壊であった。

3.2 機械的特性のパラメータ R による整理

動的荷重下の鋼材の降伏応力や引張強さはひずみ速度と試験温度の影響を受ける。このような動的荷重下での降伏応力 σ_y とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ および温度 T の関係を一義的に表すパラメータとして、ひずみ速度-温度パラメータ $R^{19,20)}$ が有効であると考えられており、これまでに種々の条件下での整理が試みられ、その有効性が検証されている^{11,13,15-17,21)}。本研究においても、降伏応力に対して次式に示すひずみ速度-温度パラメータ R を用いて実験結果を整理する。

$$R = T \cdot \ln(A_y / \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

材料定数 A_y はアレニウス型の回帰式を用いてひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ と温度 T の相関性を考慮して求めることができる。すなわち、降伏応力 σ_y はパラメータ R の関数として以下の式で表される。

$$\sigma_y = B_y \cdot \exp(C_y / R) \quad (2)$$

ここで、 B_y 、 C_y は材料定数である。

HT 50 鋼および HT 80 鋼の降伏応力 σ_y をパラメータ R で整理したものを Fig. 7 に示す。材料定数 A_y の値は、測定結果を式 (2) に回帰したときの相関性を考慮し、 $A_y = 10^8 / \text{s}$ として整理した。この図から、温度とひずみ速度が降伏応力に及ぼす影響は、パラメータ R により統一的に整理できることがわかる。

また、引張強さ σ_T についても同様の関係式で整理できると考えられるが、動的荷重を受ける場合における降伏点以後の温度上昇量はかなり大きくなると考えられることから、温度上昇の影響を考慮したひずみ速度-温度パラメータ $R^{11,13,15-17)}$ を用いて整理することを試みた。

$$R = (T + \Delta T) \cdot \ln(A_T / \dot{\epsilon}) \quad (3)$$

$$\sigma_T = B_T \cdot \exp(C_T / R) \quad (4)$$

ここで、 A_T 、 B_T 、 C_T は材料定数であり、 $A_T = 10^9 / \text{s}$ として引張強さ σ_T の結果を整理している。また、動的荷重による引張強さ到達時の温度上昇 ΔT を後述の数値解析で求めることにより、その引張強さの温度依存性に及ぼす影響を回帰的に決定している。HT 50 鋼および HT 80 鋼の引張強さ σ_T を温度上昇の影響を考慮したパラメータ R で整理した結果を Fig. 8 に示す。動的荷重による温

(a) HT 50 steel

(b) HT 80 steel

Fig. 7 Characterization of yield stress using rate-temperature parameter R .

度上昇を考慮したひずみ速度-温度パラメータ R を用いることによって、引張強さの変化はひずみ速度や温度によらずほぼ一義的に評価できていることがわかる。また、降伏時における温度上昇は無視できるほど小さいと見なせることから、降伏応力および引張強さともに温度上昇の影響を考慮したパラメータ R を用いることにより温度とひずみ速度の関係を統一的に整理できるといえる。

4. 応力-ひずみ挙動および温度上昇量の熱弾塑性解析

前章の実験で得られた降伏点および引張強さから温度上昇の影響を考慮した上で各温度、各変位速度における応力-ひずみ関係をひずみ速度-温度パラメータ R を用いて回帰的に決定し、最終的に得られた材料特性を用いて熱と応力の連成解析を行った。また、これらの解析結果を実験結果と比較し、解析手法の妥当性を検討した。

4.1 熱・応力連成解析方法

動的荷重下での材料の応力およびひずみ分布と温度上昇挙動を詳細に把握するために有限要素法を用いた大変形熱弾塑性解析を行った。解析では、(i) 高ひずみ速度による強度の上昇、(ii) 塑性仕事による熱の発生および拡散と、それに伴う温度の上昇による強度の低下、さらに、(iii) それらが互いに影響を及ぼし合う連成効果、を考慮した熱・応

(a) HT 50 steel

(b) HT 80 steel

Fig. 8 Characterization of tensile strength using modified rate-temperature parameter R which includes temperature rise effect by dynamic loading.

力連成解析を汎用有限要素法構造解析コード ABAQUS Ver. 5.8²²⁾を用いて行った。すなわち、ひずみ速度-温度パラメータ R から得られた各々の温度・ひずみ速度での降伏応力および引張強さから導かれるそれぞれの条件での応力-ひずみ関係を用いて解析を行った。

解析に用いたモデル形状を Fig. 9 に示す。解析モデルは実験に用いた丸棒試験片と同一の寸法であり、用いた要素は 4 節点軸対称要素、最小要素寸法は試験片中央部で 0.03 mm×0.03 mm である。解析モデルの節点数および要素数はそれぞれ 817, 938 である。ここで、一様伸び以降の変形時に発生するネッキングが確実に試験片中央部に現れるようにするため、試験片中央部での半径が他の部分に比べて 0.05% 小さくなるように、かつ、応力集中が無視できる程度になるように徐々に半径を小さくして要素分割を行った。また、熱伝導解析に用いた材料の物理的性質を Table 3 に示す。これらの値は本研究にて取り扱う温度範囲 (-80 °C ~ +150 °C 程度) では一定と見なしても差しつかえない²³⁾として設定した。また、ヤング率 E およびポアソン比 ν についても、この温度範囲内ではほとんど変わらないと見なせるとして、ヤング率 $E=206$ GPa、ポアソン比 $\nu=0.3$ を用いた²⁴⁾。

一方、動的荷重を受ける鋼材は、高速変形に伴う温度上昇も大きなものになると考えられることから、解析的にこれらを評価する際、使用対象となる材料の各々の一定温度における応力-ひずみ関係が必要になる。しかし、実験では動的負荷により必然的に温度が上昇してしまうため、ある一定の温度における応力-ひずみ関係を動的負荷下にお

Fig. 9 Mesh division of round-bar tension specimen for heat-stress coupling FE-analysis.

Table 3 Physical properties used for FE-analysis.

	Specific heat c (J/(kg · K))	Density ρ (kg/mm ³)	Heat diffusivity a (m ² /s)	Coefficient of linear expansion α_L (1/K)
HT50	4.8×10^2	8.0×10^{-6}	2.17×10^{-5}	1.2×10^{-5}
HT80				

いて測定することは直接的には不可能である。そこで今回の動的解析では、以下に示す手順に沿って材料の各温度、各ひずみ速度における応力-ひずみ関係を設定することによって計算を進めた。

① HT 50 鋼および HT 80 鋼それぞれの材料の降伏応力 σ_y 、引張強さ σ_T の各ひずみ速度、各試験温度における実験結果を式 (1) で表されるひずみ速度・温度パラメータ R を用いて整理する。整理した結果より、実験を行っていない条件を含めて種々のひずみ速度、試験温度に対する降伏応力 σ_y 、引張強さ σ_T を決定する。これらの値には現時点では温度上昇の影響が考慮されていない。また、解析に用いるひずみ速度、試験温度の設定に関しては、動的荷重下での変形を考えた場合、特に軟質部では高ひずみ速度になり温度上昇も大きくなると考えられることから、試験温度範囲だけではなく、温度上昇の効果を包括するようなひずみ速度、温度範囲について設定することが必要になる。

② パラメータ R から求められるそれぞれのひずみ速度および温度の条件下における降伏応力 σ_y と引張強さ σ_T 、また、一様伸び ε_T を用いて、各々のひずみ速度および温度条件に対するひずみ硬化指数 n および定数 α をそれぞれ以下のように決定する。

$$\sigma_T = \sigma_y (n/\alpha)^n \cdot \exp\{-(n-\alpha)\} \quad (5)$$

$$\varepsilon_T = \exp(n-\alpha) - 1 \quad (6)$$

ただし、一様伸び ε_T に関しては、Fig. 7 に示したようにひずみ速度や温度の影響をほとんど受けないことから、HT 50 鋼および HT 80 鋼それぞれについてすべての試験条件下における実験結果の平均値を求め、そこから HT 50 鋼の一様伸び $\varepsilon_T^{\text{HT50}}$ は 16%、HT 80 鋼の一様伸び $\varepsilon_T^{\text{HT80}}$ は 7% とした。

③ 手順②で決定したひずみ硬化指数 n および定数 α を用いて、各々のひずみ速度および温度における相当応力-相当塑性ひずみ関係を次式を用いて決定する。

$$\bar{\sigma} = \sigma_y \left(1 + \bar{\varepsilon}_p / \alpha\right)^n \quad (7)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ ：相当応力、 $\bar{\varepsilon}_p$ ：相当塑性ひずみである。

④ HT 50 鋼および HT 80 鋼それぞれの均質材に関して現状の応力-ひずみ関係を用いて引張強さ σ_T に達したときの温度上昇量を熱・応力連成 FEM 解析により求め、引張強さ σ_T を式 (3) に示す温度上昇を考慮したひずみ速度-温度パラメータ R を用いて再整理する。なお、降伏応力 σ_y に達したときの温度上昇は無視できるほど小さいと考えられることから、降伏応力の再整理は行っていない。また、塑性変形に伴う発熱に関して、本解析では鋼材の温度上昇量 ΔT を塑性仕事の 9 割が熱に変換されるものとして計算した¹⁵⁾。すなわち、熱に変換される塑性仕事量 W_T は以下のように表される。

$$W_T = 0.9 \int \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}_p \quad (8)$$

⑤ 降伏応力 σ_y に関するパラメータ R および現状の引張強さ σ_T に関する温度上昇を考慮したパラメータ R

を用いて、再び②～④の操作を応力-ひずみ関係および温度上昇挙動が実験結果とよく一致するまで回帰的に繰り返す。そこから最終的な HT 50 鋼および HT 80 鋼の相当応力-相当塑性ひずみ関係を決定し、それを用いて均質材および軟質継手の熱・応力連成 FEM 解析を行う。なお、最終的に得られた温度上昇を考慮したパラメータ R を用いて引張強さ σ_T を整理したものが Fig. 8 である。この図中に示しているように、最大荷重点での温度上昇量は動的荷重時には 30℃ 近くまで達しているため、引張強さの整理結果は温度上昇を考慮しなかった当初の整理結果と比べてかなり異なったものになる。

手順①～⑤により決定し、均質材および軟質継手の熱・応力連成解析に使用した各々のひずみ速度および温度における相当応力-相当塑性ひずみ関係の一例を Fig. 10 に示す。HT 50 鋼の変位速度 0.1 mm/s に相当するひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 0.0025/\text{s}$ と、変位速度 100 mm/s に相当するひずみ速度 $\dot{\varepsilon} = 2.5/\text{s}$ の場合についてそれぞれ示している。これらの関係は温度上昇を考慮したパラメータ R から得られ

(a) Strain rate $\dot{\varepsilon} = 0.0025$

(b) Strain rate $\dot{\varepsilon} = 2.5$

Fig. 10 Examples of relation between equivalent stress and equivalent plastic strain in each test temperature and each strain rate for FE-analysis in HT 50 steel.

た各々の温度・ひずみ速度での降伏応力および引張強さから導かれたものであり、一様伸び以降の応力-ひずみ関係についても式(7)にしたがうと見なしている。なお、HT 50 鋼に関しては、実験結果を元にすべての条件下において1.5%のリューススひずみを導入し、解析に用いる応力-ひずみ関係を補正することとした。一方、HT 80 鋼についてはリューススひずみは発生しないとしている。このような応力-ひずみ関係を用い、ミーゼスの降伏条件、等方硬化則、ひずみ増分理論の条件の下で大変形熱弾塑性解析を行った。

4.2 均質材料の実験および解析結果の比較

静的荷重下(変位速度:0.01 mm/s)および動的荷重下(変位速度:100 mm/s)におけるHT 50 鋼およびHT 80 鋼の均質材としての公称応力-公称ひずみ関係と温度上昇履歴の一例をFig. 11に示す。図中には、試験温度を室温としたときの応力・ひずみ履歴および温度上昇の解析結果

と実験結果の比較を示している。均質材の公称応力-公称ひずみ関係は、一様伸び以降の破壊に至るまでの挙動を含めて解析結果は実験結果をよくシミュレートしているといえる。ひずみ速度の増大に伴い、両鋼材とも強度が上昇していることが読みとれる。また、動的荷重下での温度上昇についても両者はほぼ一致していることがわかる。他の条件下についても、応力-ひずみ関係や温度履歴の解析結果は試験温度および変位速度によらずいずれの場合についても実験結果とよく一致していた。すなわち、これらの結果から、今回用いた熱・応力連成解析手法が妥当なものであることが検証できたといえる。また、種々の条件下での破壊に至るまでの応力・ひずみや温度の履歴や分布を精度よく求めることができるといえる。また、応力・ひずみ挙動の解析結果と測定結果がよく一致している上に、温度上昇量についても両者がよい一致を示していることは、式(8)で用いた熱に変換される塑性仕事量の割合 $\eta=0.9$ ¹⁵⁾が妥当な値であったことの検証結果にもなり得る。

(a) HT 50 steel (0.01 mm/s at R. T.)

(b) HT 50 steel (100 mm/s at R. T.)

(c) HT 80 steel (0.01 mm/s at R. T.)

(d) HT 80 steel (100 mm/s at R. T.)

Fig. 11 Comparison of stress-strain curves and temperature rise in round-bar tension specimen of HT 50 steel obtained by experiment and FE-analysis.

4.3 軟質継手の実験および解析結果の比較

軟質継手の静的荷重下(変位速度: 0.1 mm/s)および動的荷重下(変位速度: 100 mm/s)における公称応力-公称ひずみと温度上昇の挙動を Fig. 12 に示す. 図中には, 一例として試験温度を室温としたときの相対厚さ 0.15 と 1.0 の継手の応力履歴および温度挙動の解析結果と実験結果の比較を示している. 軟質継手についても一様伸び以降の破壊に至るまでの挙動を含めた公称応力-公称ひずみ関係, 温度上昇とともに解析結果と実験結果はほぼ一致していることがわかる. また, ひずみ速度の増大に伴って継手の強度が上昇し, 温度上昇量も大幅に増加していることがわかる. 一方, 一様伸びは均質材に比べてかなり小さくなっている. 軟質継手の場合, 降伏点以後の変形領域が主に軟質層のみに集中することから, それだけ温度が上昇しやすく, また, 継手全体としては変形しにくいために結果として一様伸びも減少したものと考えられる. なお, ここに示した

条件以外の挙動についても, 破壊に至るまでの応力-ひずみ関係や温度履歴の解析結果は変位速度や試験温度, 相対厚さによらず実験結果とよく一致することを確認している.

以上のように, 静的荷重時での挙動はもちろん, 動的荷重時においても破壊に至るまでの応力, ひずみ分布や温度上昇量を解析的に求めることができた. このことから, 軟質継手の強度および破壊特性を検討する上で, 実験的に求めることが困難な詳細な応力, ひずみ分布を解析結果から得ることによって, 従来にはない種々の有用な力学的考察が可能になると考えられる.

5. 結 言

動的負荷を受ける構造用鋼および軟質部を含む溶接継手を模擬した強度不均質継手について, 高速塑性変形に伴う温度上昇を考慮した熱弾塑性解析を行った. すなわち,

Fig. 12 Comparison of stress-strain curves and temperature rise in round-bar tension specimen of undermatched joints obtained by experiment and FE-analysis.

種々のひずみ速度と試験温度での機械的特性と温度上昇量を把握するため、熱と応力の連成を考慮した熱弾塑性解析を行い、さらに、その結果を実験結果と比較することにより、動的負荷を受ける構造用鋼および軟質継手の応力-ひずみ特性および高速塑性変形に伴う温度上昇履歴について検討した。その結果、均質材料としての構造用鋼および軟質継手のいずれについても、解析結果は最高荷重点以降を含めた破壊に至るまでの実験結果を精度よくシミュレートすることができた。

本研究の遂行に当たって、川崎重工業株式会社 道場康二氏、片山ストラテック株式会社 橋田知幸氏、住友金属工業株式会社 川畑友弥氏に多大なご支援をいただいた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) V. V. Bertero, J. C. Anderson and H. Krawinkler: Performance of Steel Building Structures During the Northridge Earthquake, The Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, Report No. UCB/EERC-94-09 (1994).
- 2) 豊田政男：建築鉄骨が壊れた一阪神大震災の鉄骨構造被害と教訓，溶接技術，43-9 (1995)，101-110.
- 3) J. M. Krafft and A. M. Sullivan: Effects of Speed and Temperature on Crack Toughness and Yield Strength in Mild Steel, Trans. ASM, 56 (1963), 160-175.
- 4) A. R. Rosenfield and G. T. Hahn: Numerical Description of the Ambient Low-Temperature and High-Strain Rate Flow and Fracture Behavior of Plain Carbon Steel, Trans. ASM, 59 (1966), 962-980.
- 5) 砂本大造，佐藤正信，船田立夫：鉄鋼材料の動的破壊靱性，三菱重工技報，11-6 (1974)，775-780.
- 6) Y. Nakano, Y. Sakai, G. Yagawa, K. Ando and Y. Ando: Dynamic Fracture Toughness of LWR Pressure Vessel Steel A508 Cl. 3: A Japanese Round-Robin Study, Int. J. Pres. Ves. Piping, 31 (1988), 255-270.
- 7) Y. Liu, J. Zhu, H. Zhou and P. S. Follansbee: Variation of Yield Stress with Strain Rate for Three Carbon Steels, Trans. ASME, J. Eng. Mater. Tech., 114 (1992), 348-353.
- 8) K. Kussmaul, T. Link, A. Klenk and T. Nguyen-Huy: Determination of Crack Initiation and Crack Resistance Using Compact Specimens and Comparison with Results of Numerical Simulation of Dynamically Loaded Wide Plates, Nucl. Eng. Des., 151 (1994), 489-502.
- 9) J. M. Krafft and G. R. Irwin: Crack-Velocity Considerations, Fracture Toughness Testing and Its Applications, ASTM STP 381, American Society for Testing and Materials (1965), 114-129.
- 10) J. R. Rice and N. Levy: Local Heating by Plastic Deformation at a Crack Tip, Physics of Strength and Plasticity, Edited by A. S. Argon, M. I. T. Press (1969), 277-293.
- 11) 藤井英輔，大熊 勇，川口喜昭，塚本雅敏：鋼材の動的破壊靱性特性における温度およびひずみ速度の影響の検討，日本造船学会論文集，158 (1985)，619-629.
- 12) 佐野謙一：9% Ni 鋼の破壊靱性に及ぼすき裂先端における温度上昇の影響，鉄と鋼，73-2 (1987)，380-386.
- 13) 豊貞雅宏，藤井英輔，野原和宏，川口喜昭，有持和茂，井坂和実：破壊靱性に及ぼすひずみ速度の影響，日本造船学会論文集，161 (1987)，367-380.
- 14) 中野善文，久保高宏：压力容器用鋼材の破壊靱性に及ぼす負荷速度の影響，材料，39 (1990)，1417-1423.
- 15) 豊貞雅宏，後藤浩二，相良憲何：高速負荷時におけるき裂先端近傍の局部温度上昇について，日本造船学会論文集，170 (1991)，651-663.
- 16) 南二三吉，橋田知幸，豊田政男，大村 剛，森川 潤，有持和茂，菅田 登：ローカルアプローチの適用による構造用鋼の動的破壊靱性評価—破壊制御設計へのローカルアプローチの展開 (第3報)，日本造船学会論文集，184 (1998)，453-464.
- 17) 田川哲哉，島貫広志，萩原行人，宮田隆司：動的破壊靱性解析へのローカルアプローチの適用とその問題点，日本造船学会論文集，185 (1999)，309-317.
- 18) 豊田政男：低強度溶接金属をもつ溶接継手の静的引張特性に関する研究，大阪大学提出学位論文 (1973).
- 19) P. E. Bennett and G. M. Sinclair: An Analysis of the Time and Temperature Dependence of the Upper Yield Point in Iron, Trans. ASME, J. Basic Eng., 83 (1961), 557-564.
- 20) P. E. Bennett and G. M. Sinclair: Parameter Representation of Low-Temperature Yield Behavior of Body-Centered Cubic Transition Metals, ASME Publication, 65-MET-11 (1965), and also Trans. ASME, J. Basic Eng., 88 (1966), 518-524.
- 21) H. T. Corten and A. K. Shoemaker: Fracture Toughness of Structural Steels as a Function of the Rate Parameter $T \ln A/\dot{\epsilon}$, Trans. ASME, J. Basic Eng., 89 (1967), 86-92.
- 22) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS/Standard User's Manual, Version 5.8, Vols. 1 to 3 (1998).
- 23) 日本機械学会編：伝熱工学資料 改訂第4版，日本機械学会 (1986)，314-319.
- 24) 日本機械学会編：技術資料 金属材料の弾性係数，日本機械学会 (1980)，64-85.