

鉄系形状記憶合金を用いた小型継手の強度とその速度依存性評価

広島大学 大学院工学研究科
准教授 岩本 剛
(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015006)

キーワード：鉄系形状記憶合金，継手強度，速度依存性

1. 研究の目的と背景

鉄系形状記憶合金は Fe-Mn-Si 合金系で実用化され、Ni-Ti 系合金に比して安価であり、大型の構造用部材のみ適用されている。

大型構造物への適用の理由は、形状記憶効果によって回復するひずみが Ni-Ti 系合金に比して小さいことから、回復する変形量を大きく取るためには大型構造物への適用に限定される。小型構造物への適用を考えると更なる改善が必要となる。そのような大型構造物は一般に地震や風荷重による準静的から動的あるいは衝撃までの広範なひずみ速度域における変形を受けるが、その速度依存性を考慮した研究はあまり存在しない。

形状記憶効果を最大限発揮させるような予加工については、エキスパンド加工法¹⁾とトレーニング処理²⁾の組み合わせ³⁾が有力であるが、予加工法については、生じる応力誘起マルテンサイトのバリエーションを加工方向によって制御できる可能性があることから、検討の余地があると言える。さらに、上記速度依存性を含めた検討も重要である。

そこで本研究では、予加工について簡便な方法⁴⁾を採用する。この際、トレーニング処理は多大な効果が期待できることが知られているため、意図的にその処理を施さず実施する。鉄系形状記憶合金を用いた外径 $\phi 30$ 程度の小型継手を作成し、準静的から衝撃変形域の広範な速度域において、丸棒のみ挿入し、圧縮・せん断試験を行い、継手強度を評価する。

2. 実験方法

2・1 使用材料及び試験片

本研究において、継手として淡路マテリア製鉄系形状記憶合金 Fe-28Mn-6Si-5Cr 合金（以降 Fe-SMA と呼称）を用いる。表 1 に、Fe-SMA の化学成分（mass%）を示す。図 1 に、本研究において用いる(a)締結材である Fe-SMA 製継手、(b)被締結材である SUS304 製丸棒の寸法形状を示す。形状記憶効果を利用する際、継手と丸棒間において相互に生じる圧力（以降、締付圧力と呼称）を用いて締結するため、継手の内径は丸棒の外径と比して小さく設計する。製作した継手において、切削加工の際に発生した組織中の残留応力を除去するため、リングファーンズ（森田製作所製、TMF-500）を用いて 1227K において 30 分間加熱保持後、水中急冷することによって固溶化熱処理を施す。

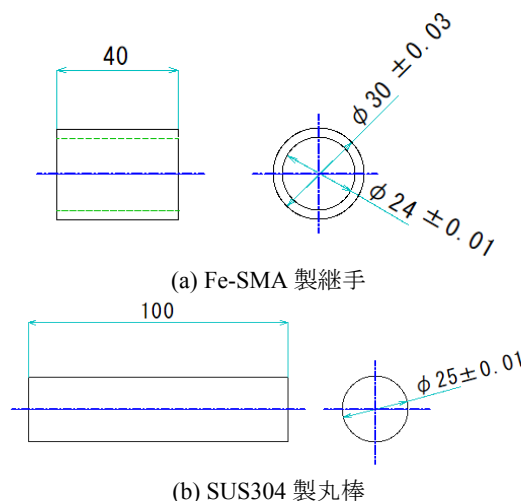


図 1 継手および被締結材の寸法形状

表 1 Fe-SMA の化学成分 (mass%)

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr
mass %	0.01	6.06	28.15	0.003	0.013	4.82
化学成分	N	Ni				
mass %	0.009	0.04				

2・2 拡張ならびに締結方法

前述の通り、継手の内径は丸棒の外径より小さく設計しており、丸棒が挿入可能な寸法に達するまで、力学的手法により継手直径を強制的に拡張させることによって、応力誘起マルテンサイトを発生させる。この工程を拡張工程と呼称する。拡張工程後の継手に対し、SUS304 製丸棒を挿入し、Fe-SMA のマルテンサイト逆変態温度 A_s 以上に加熱することにより、形状記憶効果に伴う形状回復が発生し、締結を可能とする。この工程を加熱締結工程と呼称する。

本研究において、以下に示す拡張方法を用いて、継手表面におけるひずみが約 3% となるように拡張を行う。本工程を、インストロン型材料試験機（島津製作所製、Autograph AG250kN-X）を用いて、準静的速度条件下において実施する。図 2 に、一方向直接圧入法による(a)拡張方法の概略図、および(b)拡張時の写真を示す。本方法は、この図に示すように、継手に対しテーパ棒を一樣の速度において圧入させることにより、継手に対し拡張処理を施すことが可能となる。圧入の進行に伴い、テーパ棒において反作用による抵抗が増加し、圧入方向に変化が生じる上、状況によっては圧入方向が不安定となることが想定される。その結果、拡張時における継手のひずみ状態において

局所的な分布が生じることが考えられる。そのため、テーパ棒の圧入方向を極力固定し、均一な継手の拡張径を実現するために、図 2 (b)に示すようにダイセットを用いる。ダイセットを用いることにより、拡張径におけるひずみ挙動および残留ひずみの測定に、高い再現性が期待される。テーパ棒および台座治具それぞれの材質としてSKD11(ダイス鋼)を用いる。テーパ棒の断面は円形であり、平行部における直径は25.2mmとなるよう、切削加工により製作する。また、本方法において、テーパ棒の圧入量は約90mmであり、ダイセットに、テーパ棒および台座治具を固定するため、それぞれ雄ねじ、雌ねじ加工を施す。

テーパ棒の圧入速度は、材料試験機のクロスヘッド変位速度を制御することにより、5mm/min と設定する。この際、テーパ棒及び継手内表面に生じる摩擦を軽減するために、継手内面にモリブデングリスを塗布する。試験終了条件は、テーパ棒が継手内部を通過し、外力値が0となった際に終了するように設定する。本方法において、継手においては、テーパ棒が圧入する方向を継手上部、反対側を継手下部と呼称し、ひずみの測定を行う。

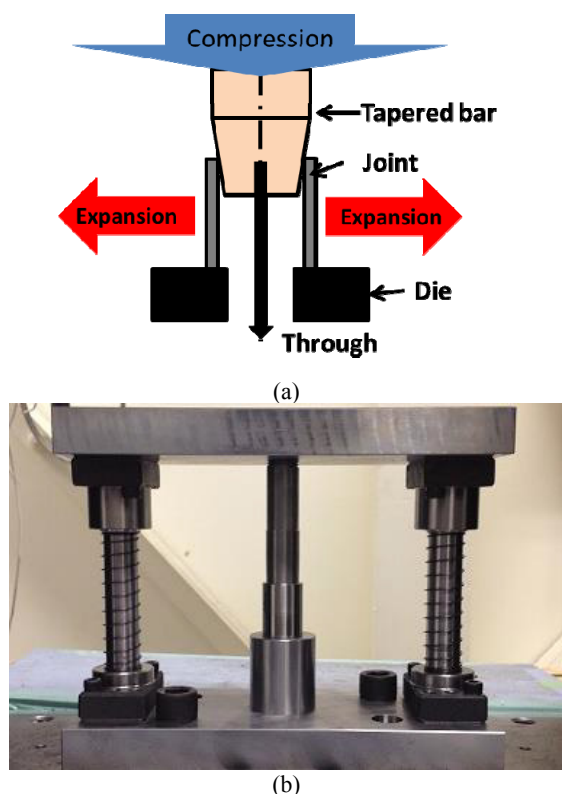


図2 一方向直接圧入法による(a)拡張方法の概略図、および(b)拡張時の写真

本研究において、継手において生じる変形過程、および拡張後における残留ひずみが管継手強度に及ぼす影響を評価するために、継手外表面において二軸ロゼッタゲージ(共和電業製, KFG-5-120-D16-11)を貼付し、拡張時における周方向、および軸方向ひずみの測定を行う。図3に、ひずみゲージを貼付けた継手の(a)写真および(b)模式図

を示す。この図(b)に示す通り、継手中央より長手方向に上下10mmの位置にひずみゲージを1枚ずつ貼付する。これらのひずみゲージは、1アクティブゲージ法によってブリッジボックス(共和電業製, DBB-120A)に接続し、動ひずみ測定器(共和電業製, DPM-712B)を用いて信号を増幅する。

前節において述べた各方法を用いて拡張を行った各継手において、貼付したひずみゲージを除去し、同位置周方向に常温硬化型接着剤(共和電業製, PC12B)を用いて、高温用ひずみゲージ(共和電業製, KFH-2-120-C1-16)を貼付し、加熱締結時における周方向ひずみの挙動を測定する。このひずみゲージの更新作業を必要とする理由は、拡張時における最大ひずみが約3.5%に達することに対し、高温用ひずみゲージの許容最大ひずみが約2.1%であり、高温用ひずみゲージの計測範囲外となることに起因する。ひずみゲージは拡張時と同様に、1アクティブゲージ法を用いてブリッジボックスに接続し、動ひずみ測定器を用いて信号を増幅する。継手に対し丸棒を左右対称に挿入した後、未締結状態の管継手試験片を台座に設置し、自然対流方式低温乾燥器(アズワン製, ON450)内に設置する。加熱締結条件として、120分かけて炉内を523Kまで昇温させた後、昇温後、一定温度に90分間保持し、乾燥機を停止させ、炉冷することによって、継手の締結を行う。

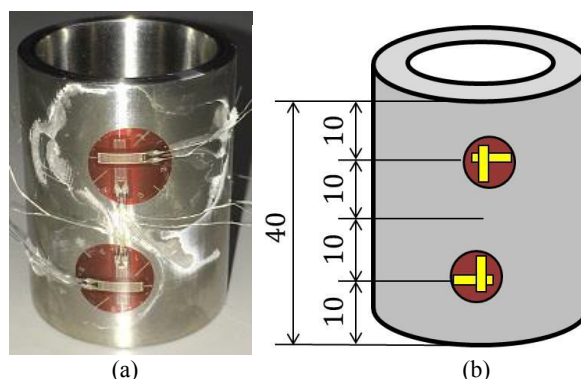


図3 ひずみゲージを貼付けた継手の(a)写真および(b)模式図

2・3 実験方法及び使用装置

図4に、圧縮・せん断試験時における(a)写真及び(b)試験の概略図を示す。この図に示すように、製作した治具に試験片を挿入し、継手下部側を治具上に設置することによって、継手試験片の上下方向の移動を拘束する。その上で、材料試験機を用いて圧縮・せん断試験を実施することにより、鋼管あるいは丸棒に対し、押し出し試験を可能とする。この際、継手下部と治具間に発生する摩擦が強度に及ぼす影響を軽減するため、継手と治具の接触面に潤滑油としてモリブデングリスを塗布する。

準静的押し出し試験において、材料試験機(島津製作所製, Autograph AG-250kN-X)を用いて実験を行う。また、試験時に締結工程において使用した高温用ひずみゲージを用

いて、管継手押出時における継手周方向ひずみの変化を測定する。ひずみゲージは1アクティブゲージ法を用いてブリッジボックス（共和電業製，DBB-120A）に接続し，動ひずみ測定器（共和電業製，DPM-712B）を用いて信号を増幅させる。

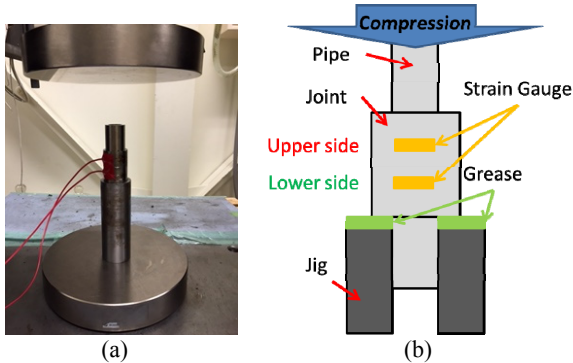


図4 圧縮・せん断試験時における(a)写真及び(b)試験の概略図

図5に、本実験において用いる落錘型衝撃試験の概要図を示す。準静的試験の場合と同様に、試験装置下部に治具及び試験片を設置した後、錐体を任意の高さより自由落下させることによって、衝撃速度条件下において圧縮・せん断試験を行うことが可能となる。また、錐体の質量及び落下距離を調節することによって、試験片の変形量及び変形速度を任意に調整可能となる。

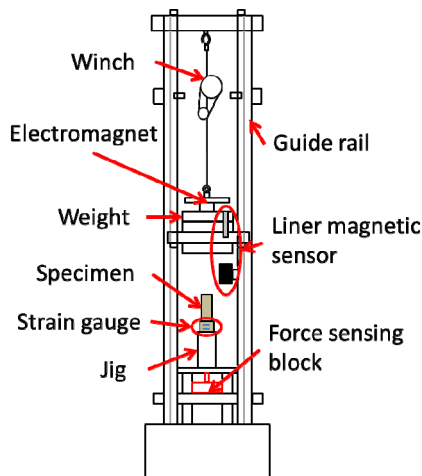


図5 落錘型衝撃試験の概要図

本実験において、錐体高さを試験片上部より高さ80mm、錐体質量を1.6kNに決定する。この際、自由落下を想定すると、試験速度は力学的エネルギー保存則より理論的に推定可能である。また、本試験装置において、錐体衝突直前の落下速度を測定するため、錐体が管継手試験片に衝突する直前の箇所に、鉛直方向に50mmの間隔で光ファイバーセンサーとアンプ（キーエンス製，FU-77V及びFS-V31，FS-V32）を設置する。光ファイバーセンサーの信号をデジタルオシロスコープ（IWATSU製，DS5102）に入力し、

各波形の立ち上がりの時刻差を測定することによって、錐体衝突直前の平均速度を算出することが可能となる。試験片に作用する外力は、試験装置下部に設置した検力ブロック⁵⁾を用いて測定する。検力ブロックの小突起部にひずみゲージを表裏軸対称位置に貼付する。ひずみゲージはブリッジボックス（共和電業製，DB-350）に接続し，シグナルコンディショナ（共和電業製，CDV-700A）により信号を増幅し，デジタルオシロスコープ（YOKOGAWA製，DL2700）に入力し，測定を行う。

図6に本実験において用いる分割式ホプキンソン棒（SHPB）法に基づく衝撃圧縮試験装置の概略図を示す。この図に示す通り，本試験装置は空気銃，ランチャー，打撃棒，入力棒，出力棒及び各種測定装置であるブリッジボックス，シグナルコンディショナ，デジタルオシロスコープにより構成される。入出力棒において，試験片固定部端面よりそれぞれ1000mm，35mmの位置にひずみゲージを表裏軸対称となるように貼付する。これらのひずみゲージより，応力棒中を伝播する応力波を検出する。

図7に，試験片設置個所の概略図を示す。この図に示すように，出力棒中に深さ35mm，内径26mmの穴加工を施している。穴中に試験片の片側を挿入した後，試験片他方側端面に入力棒端面を接触させることにより，試験片の変位を拘束する。この際，試験片のたわみによる影響を取り除くために，試験片継手部においてV字ブロックを設置する。本試験において，ひずみゲージより得られた入射波，反射波および透過波を用いて，入力棒，出力棒におけるひずみを算出し，それらの値を用いて外力，変位を算出する。

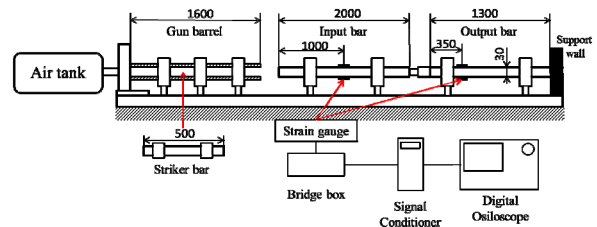


図6 SHPB法に基づく衝撃押出試験の概略図

3. 実験結果及び考察

3・1 拡張ならびに締結過程

図8に、拡張方法1を用いて得られた、テーパ棒と継手間に生じる外力の時刻歴を示す。この図より、外力は概ね一定の割合で上昇していることが分かる。これは、テーパ棒が一定の速度で圧入しており、加えてテーパ棒のテーパ部および継手内面との接触状態が一様であることを示している。外力が上昇後、約450s付近において外力は最大値を示しており、その後一定の値を示す領域が現れている。これは、テーパ棒の圧入に伴い、継手内表面との接触状態がテーパ部から平行部に遷移していることを示している。これ以降、テーパ棒の移動に伴い、平行部との接触面積が減少するとともに、外力は徐々に減少し、完全な除荷状態

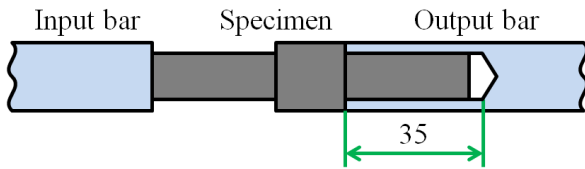


図 7 SHPB 法に基づく衝撃押出試験における試験片周辺の概略図

となる。また、本拡径方法においては、非常に高い再現性を有していることが分かる。

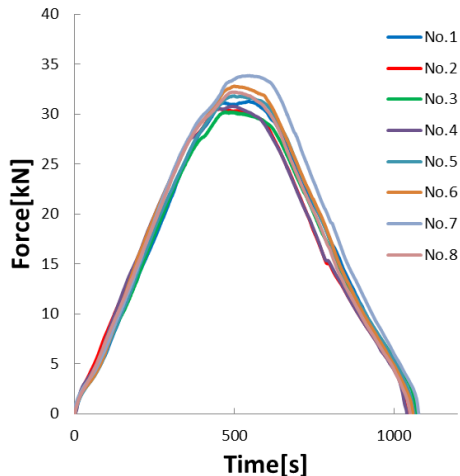
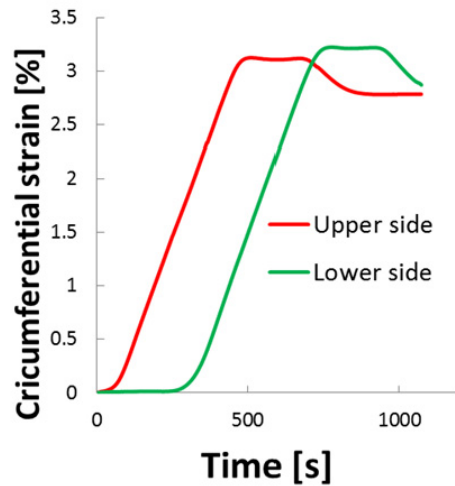


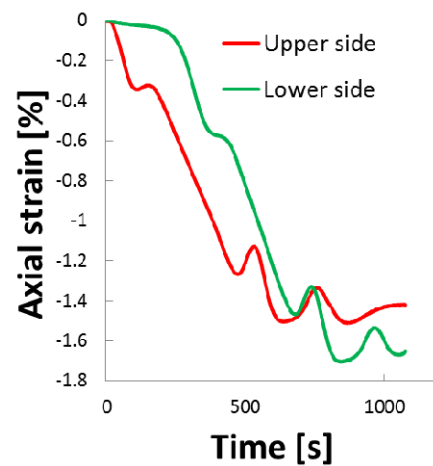
図 8 拡径過程における外力の時刻歴

図 9 に、得られた(a)周方向ひずみおよび(b)軸方向ひずみの時刻歴を試験片番号 1 の場合について示す。この図(a)に示すように、周方向ひずみは引張方向に生じており、継手の拡径が正常に実施されていることが分かる。なお、テーパー棒を継手上部より圧入させることから、継手上部における周方向ひずみに早期に変化が生じている。テーパー棒圧入後、一定の割合で周方向ひずみは増加するが、時刻が約 450~550s の区間において、継手上部の周方向ひずみは一定の値を示すことが観察可能である。これは、テーパー棒の圧入に伴い、ひずみゲージの貼付け位置をテーパー棒の平行部が通過したこと起因する。その後、約 650~700s において、平行部がひずみゲージ貼付け位置を完全に通過し、継手において弾性回復が生じることから、周方向ひずみが減少し、再度一定値に達した後、定常状態を示していることが観察可能である。一方、図(b)より、軸方向ひずみは減少し、圧縮変形をしていることが分かる。周方向ひずみと同様に、継手上部におけるひずみから変化が生じている。テーパー棒の圧入に伴い、軸方向ひずみはほぼ線形的に減少し、その後一定の値を示す。しかしながら、周方向ひずみとは異なり、ひずみ挙動において鋸波状の振動波形が観察可能である。これは、テーパー棒と継手内表面間に摩擦が生じ、圧縮変形と弾性回復が繰り返し発生することによる、Stick-Slip 現象であると考えられる。また、上部に対し、下部の残留ひずみが多いことが観察できる。これは、テ

ーパー棒を一様に圧入させることにより、継手下部において長期間負荷が生じることに起因するものと考えられる。



(a) 周方向ひずみ



(b) 軸方向ひずみ

図 9 拡径過程における各ひずみの時刻歴

図 10 に、加熱締結時における周方向ひずみの時刻歴を示す。この図から、加熱工程初期において、周方向ひずみは若干増加していることが分かる。これは、本研究において用いる Fe-SMA のマルテンサイト逆変態温度が 363~383K であることから、初期の低温状態では逆変態は発生せず、熱膨張が支配的であると考えられる。その後、昇温に伴って周方向ひずみが減少する。これは、継手の温度が A_s 点に達することにより、継手においてマルテンサイトに逆変態が発生し、形状回復が生じることに起因するものと考えられる。しかしながら、5000s 付近において、周方向ひずみは最小値を示した後、再び増加している。これは、逆変態の進行に伴い、継手に挿入した丸棒表面と継手内表面間が接触し、形状回復が抑制されるものと考えられる。

3・2 準静的押出試験

図 11 に、準静的押出試験によって得られた、外力および周方向ひずみー変位の関係を示す。それぞれの結果にお

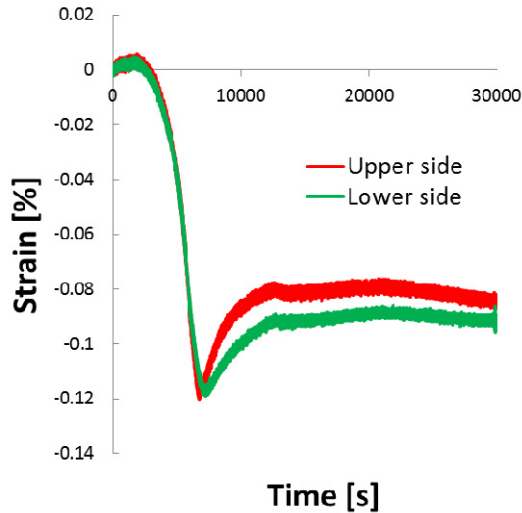


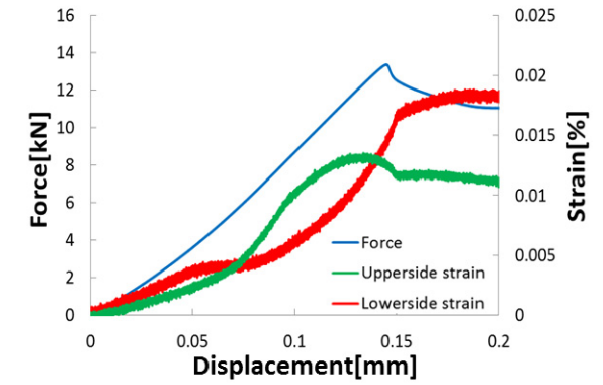
図 10 加熱締結過程における周方向ひずみの時刻歴

いて、試験開始とともに外力は上昇し、最大値を示した後減少し、定常値を示すことが観察できる。周方向ひずみに関して、同様に上昇し、最大値を示し、定常値を示すことが観察できる。ここで、変位速度 0.0083, および 0.083mm/s の結果に着目すると、継手上部の周方向ひずみに関して、最大外力を示す以前に傾きが変化している箇所が観察できる。これは、試験片上部から負荷を加えることによって、この時点で継手上部において継手と丸棒間において相対すべりが発生しているためであると考えられる。この現象は、後述する結果においても、拡張方法に依存せず観察できることから、この点において継手はその機能を喪失していると判断し、周方向ひずみの値が急激に変化する点における外力を、継手軸方向強度と定義する。

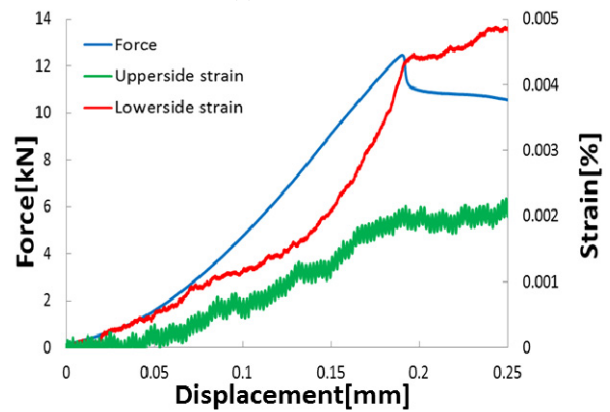
一方、変形速度 0.83 および 8.3mm/s において、前述のひずみの時刻歴曲線における傾きの変化は認められない。しかしながら、試験開始初期段階において継手上下部における周方向ひずみの値が一致していることが観察できる。このことより、変形速度が 0.83mm/s 以上の場合において、継手周方向ひずみの時刻歴の傾向が変化しているものと考えられる。それに伴い、破壊のメカニズムが変化すると考えられる。従って、変形速度 0.83mm/s 以上の場合においては、継手上下部における周方向ひずみの値が不一致となる点において継手その機能を喪失したものとし、この点における外力を、軸方向強度と定義する。

3・3 衝撃押出試験

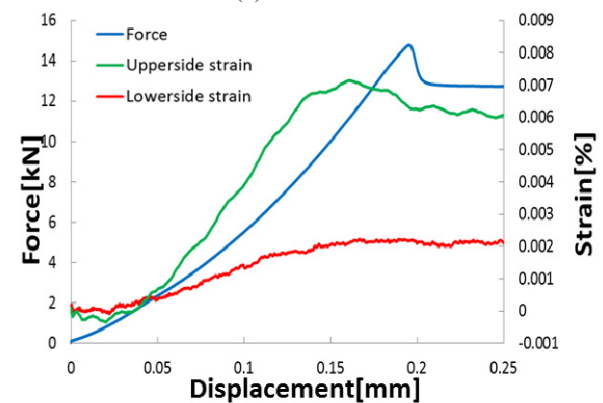
図 12 に、(a) 落錘型衝撃試験装置、(b) SHPB 試験を用いて得られた、外力および周方向ひずみ-変位の関係を示す。この図(a)に示すように、試験開始直後、外力は緩やかに上昇し最大外力として約 10kN を示した後、定常値を示す。外力に関して、準静的試験の結果と比して小さい値を示していることが観察される。一方、周方向ひずみに着目すると、外力とは異なり試験開始とともに急上昇し、最



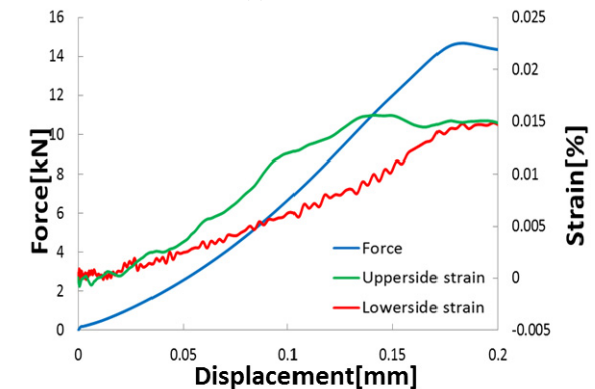
(a) 0.0083mm/s



(b) 0.083mm/s



(c) 0.83mm/s



(d) 8.3mm/s

図 11 準静的範囲の各速度において得られた外力、周方向ひずみおよび変位関係

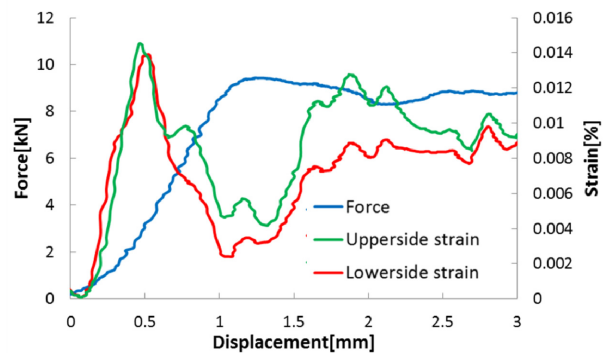
大外力を示す以前にひずみの値は最大値を示す。その後、試験装置に生じた振動の影響により、周方向ひずみは一時的に減少するが、再度上昇した後、定常値を示す。周方向ひずみに関して、準静的試験における 0.83, 8.3mm/s の場合と同様に、継手上下部における周方向ひずみの値が一致していることが観察できる。その後、変位約 0.6mm において、ひずみの値は一致しなくなる。このように、変形速度 0.83, 8.3mm/s の場合と同様の現象がみられることから、本条件においては同様に、継手上下における周方向ひずみが一致しなくなる点において破壊が発生しているものと判断し、この点における外力を、軸方向強度と定義する。また、この図(b)に示すように、試験開始とともに外力、および周方向ひずみは増加し、最大値を示した後減少していることが観察できる。外力に関して、変位約 0.15mm において、入力棒、出力棒中に生じる外力が一致しなくなることを観察できる。これは、この点において継手その機能を完全に喪失したため、応力波が正常に伝播しなくなり、動的平衡を満足しない状態となるためである。したがって、この点以降の実験結果は妥当性に欠けるため、変位 0.15mm 未満の領域において議論する。周方向ひずみに着目すると、前節と同様に、試験開始直後において継手上下部における周方向ひずみは一致するが、変位約 0.1mm において、ひずみの値に差が生じ始めることが観察できる。したがって、変位速度 0.83mm/s 以上の場合と同様に、周方向ひずみの値に差が生じる点における外力を、軸方向強度と定義する。

図 13 に、本研究により得られた最大外力および軸方向強度を、変形速度をパラメータに示す。最大外力に着目すると、変形速度に依存せず約 14kN の値を示しており、落錘試験において急激な減少を示しているが、速度依存性は観察困難である。一方、軸方向強度に関して、変形速度 0.083 以下の領域において、負の速度依存性が認められるが、変形速度 0.83mm/s 以上において、正の速度依存性が観察可能である。これは、前述したように、変形速度によって周方向ひずみの挙動に変化が生じ、それに伴い破壊のメカニズムに変化が生じるものと考えられる。

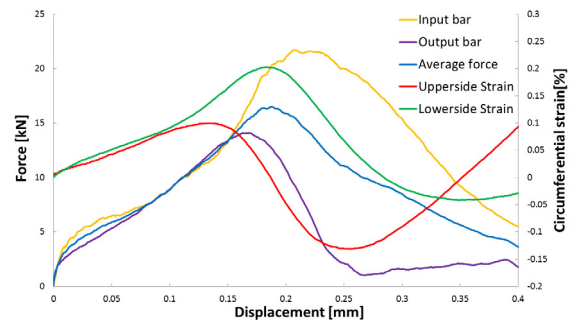
4. 結言

本研究において、管継手を製作し、軸方向強度の定義および速度依存性評価を行った。また、妥当性を検討するために、引張試験を用いた鋼管の引抜や、被締結材を鋼管とした際に得られた軸方向強度と比較を行った。

1. 変形速度 0.083mm/s 以下の場合と、0.83mm/s 以上の場合において、破壊のメカニズムに変化が生じ、それに伴い速度依存性に特異な挙動が認められた。
2. 継手軸方向強度は、変形速度 0.083mm/s 以下の場合には負、0.83mm/s 以上の場合には正の速度依存性を示し、8.3mm/s の場合に極小値を示すことが観察可能である。



(a) 落錘型衝撃試験



(b) SHPB 試験

図 12 各衝撃試験において得られた外力、周方向ひずみおよび変位関係

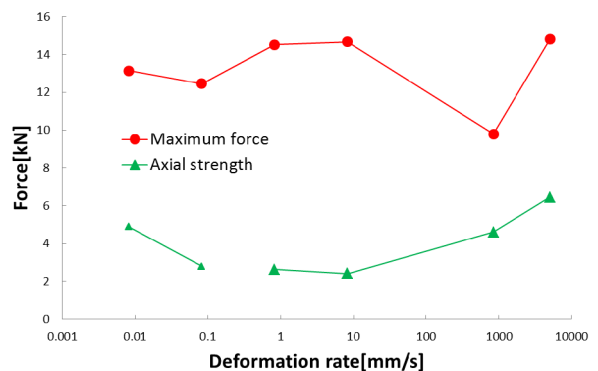


図 13 最大外力、軸方向強度および変形速度関係

謝 辞

本研究は（公財）天田財団一般研究開発助成の補助を受けて遂行した。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 和田 学・直井 久・丸山忠克：材料とプロセス，17 (2004) 1044.
- 2) 森岡頼弘・友田 陽：鉄と鋼，83-6 (1997) 389.
- 3) H. Otsuka・M. Murakami・S. Matsuda：Proc. Int. Meeting on Advanced Materials，9 (1989) 451.
- 4) Y. Joto・M. Wada・H. Naoi・T. Maruyama：Proc. of IMECE2004 (2004) 753
- 5) Y. Chuman・K. Mimura・K. Kaizu・S. Tainimura：Int. J. Impact. Eng.，19-2 (1997) 165