

戦略的基盤技術高度化支援事業

「長周期地震動にも対応できる建築用超高性能メンテナンスフリー  
制震ダンパーを実現するための Fe-Mn-Si 系合金制震材料の  
溶接・非破壊検査技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 株式会社竹中工務店

# 目次

## 第1章 研究開発の概要

- 1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標……………1
- 1 - 2 研究体制（研究組織・管理体制、管理員及び研究員）……………2
- 1 - 3 成果概要……………4
- 1 - 4 当該研究開発の連絡窓口……………5

## 第2章 本論

- 2 - 1 Fe-Mn-Si 系合金母材および溶接材料の作り込み
  - 2.1.1 Fe-Mn-Si 系合金母材の作り込み……………6
  - 2.1.2 溶接材料の作り込み……………9
  - 2.1.3 溶接条件の最適化……………11
- 2 - 2 溶接部の非破壊検査技術と低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発
  - 2.2.1 溶接部の非破壊検査技術の開発……………15
  - 2.2.2 低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発……………17
- 2 - 3 本技術（溶接・非破壊検査技術）を用いたメンテナンスフリー制震ダンパーの試作と性能検証
  - 2.3.1 メンテナンスフリー制震ダンパーの試作……………20
  - 2.3.2 制震ダンパーの性能検証……………24

- 最終章 まとめと今後の方針……………25

## 第1章 研究開発の概要

### 1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究開発の背景

地震国である我が国において、地震に対する構造物の安心・安全を確保する制震技術は社会的、経済的にも特に重要な意味を持っている。現在実用化されている制震ダンパーは、極低降伏点鋼を用いた金属系制震ダンパー、粘弾性体を用いた制震ダンパー、オイルダンパーなどが代表的である。これらのなかでも極低降伏点鋼を用いた金属系制震ダンパーが最も普及している。しかしながら、金属系ダンパーは、地震後の加工硬化やひずみ劣化は避けられず、被災後は場合により点検・交換が必要であり、さらに、昨今注目されるようになった大きな揺れが通常地震よりも長く継続する長周期地震動への対応は困難であるという課題を抱えている。

このような状況を解決するため、我々は Fe-Mn-Si 系合金の変形メカニズムと優れた低サイクル疲労特性に着目し、基礎研究を行ってきた。その成果として、本合金は素材レベルで「応力誘起マルテンサイト変態とその逆変態」という独特な変形機構により極低降伏点鋼の約 10 倍の低サイクル疲労寿命を示すことを実証した。

一方、制震ダンパーとして Fe-Mn-Si 系合金を低コストで大断面として「部材化」にするには、例えば板材から H 形鋼のような所定の大断面形状部材に組立てたり、既存の躯体(高強度鋼材)に接続するための溶接技術が必須となる。しかしながら、本合金は高マンガン組成であるため、市販の溶接材料では溶接が困難であることに加え、素材製造時に凝固からの冷却過程で変態が起こらないため、結晶粒が粗大になりやすく溶接部に不合格欠陥がないことを確認するための非破壊検査技術も確立できていない。したがって、溶接部の品質が確保できず、検査の手法も確立されていないため素材ポテンシャルを生かせず製品化が望めない状況である。従って、本合金の溶接技術と品質管理のための非破壊検査技術の確立は最も重要な技術課題となっている。

本研究において解決を目指す技術課題は、溶接の前例のない Fe-Mn-Si 系合金に対して、溶接技術と非破壊検査技術を確立し、長周期地震動にも対応できる建築用超高性能メンテナンスフリー制震ダンパーの実用化を目指すというものである。

#### (2) 研究の目的及び目標

Fe-Mn-Si 系合金の優れた制震性能を長期間に渡ってメンテナンスフリーで使用できる制震ダンパーとして活用するために、「Fe-Mn-Si 系合金同士の溶接」と「Fe-Mn-Si 系合金と建築構造用鋼材の間の溶接」両面で、信頼性の高い技術を開発することを目標とする。また、溶接部の健全性を非破壊的に検査できない限り、品質保証の観点から制震ダンパーとしての実用化は望めないため、非破壊検査技術(超音波探傷)の開発も合わせて進める計画とした。高度化目標は、中小企業の特定制品のづくり基盤技術の高度化に関する指針(十七)溶接技術に係る技術に関する事項(2)建設機械に関する事項高度化目標から、以下の2つの項目について設定した。

##### ア. 機械的特性の向上

例えば、高層や、超高層建築物用高性能制震ダンパー向けの Fe-Mn-Si 系合金同士の同材質溶接部及び Fe-Mn-Si 系合金心材と建築用高強度鋼支持部の異材質溶接部の機械的特性向上目標は、引張強度 500MPa 以上、シャルピー衝撃強度 70J(0 )以上、及び、異材質溶接部の疲労特性試験において、従来使用されている極低降伏点鋼心材以上の疲労強度を有することである。この目標値を達成するために新たに溶接材料を開発するなど、溶接技術の高度化を図る。

##### オ. 低ヒューム化等作業環境の向上

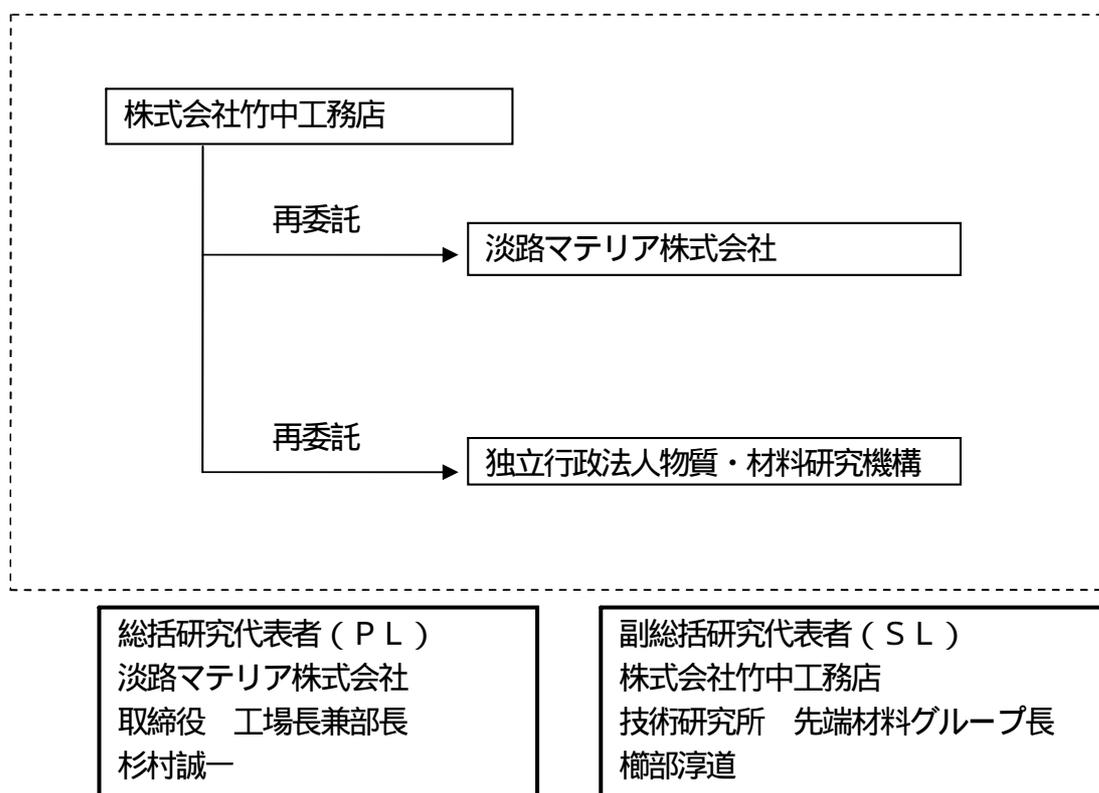
Fe-Mn-Si 系合金のような高マンガン鋼では溶接時に人体に有害なヒュームが大量に発生する。そこで本研究開発では、このヒュームを吸引することにより作業環境の向上と作業員の安全を確保する機能を付与した半自動溶接機を試作開発する。

以上の溶接技術高度化目標を達成し、最終成果物である制震ダンパーを実現するための研究課題として、「1. 溶接する母材と溶接材料の作り込みおよび溶接条件の最適化」、「2. 溶接部の非破壊検査技術と低ヒューム化等作業環境を向上する溶接機の開発」、「3. 本技術を用いた実大サイズのメンテナンスフリー制震ダンパーの試作と性能検証」の3つの課題を設定した。

## 1 - 2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

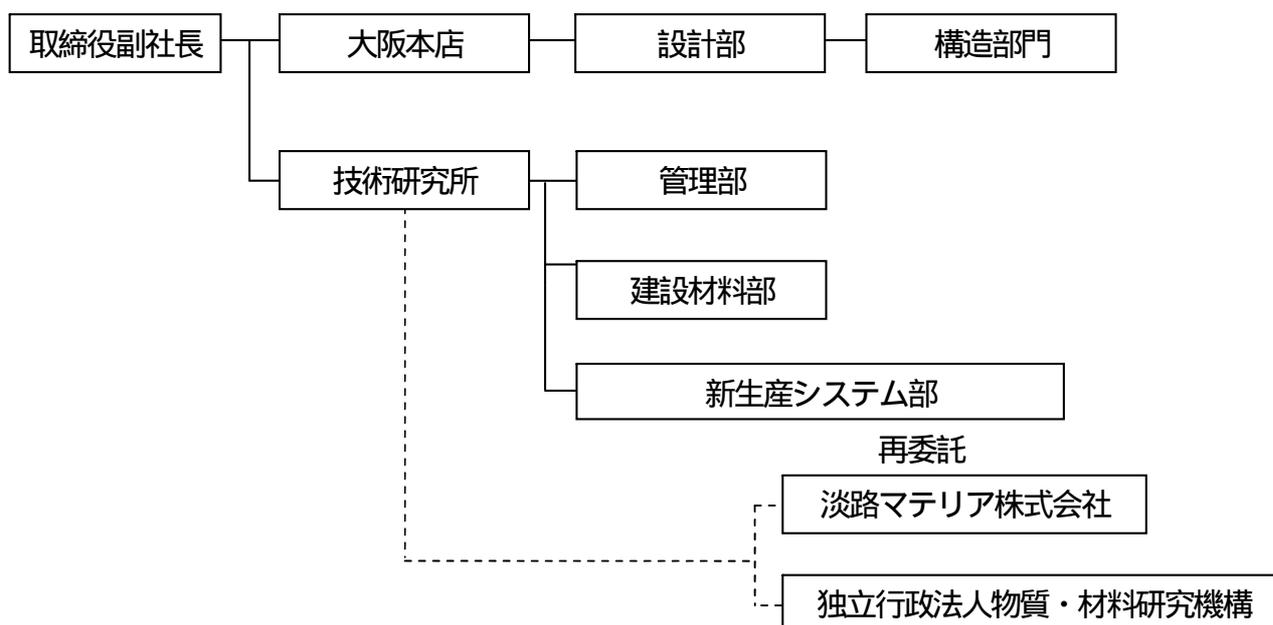
#### 1) 研究組織(全体)



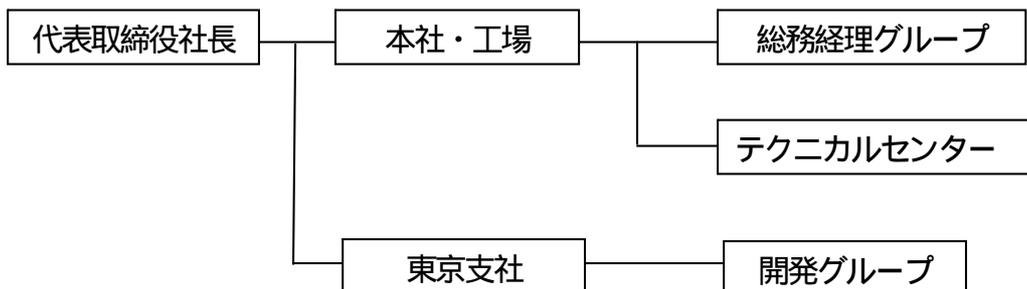
#### 2) 管理体制

##### 事業管理機関

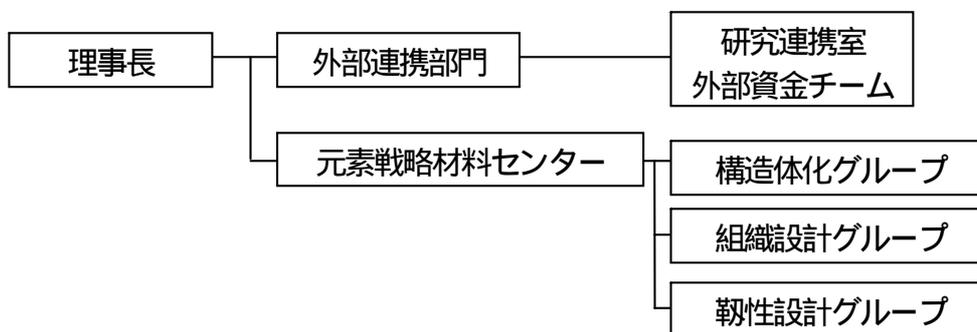
[株式会社竹中工務店]



再委託先  
[淡路マテリア株式会社]



再委託先  
[独立行政法人物質・材料研究機構]



(2) 管理員及び研究員

[事業管理機関]株式会社竹中工務店

管理員

氏名	所属・役職
鶴巻 均	技術研究所 管理部 研究リソース運営課長
羽成 真祐奈	技術研究所 管理部 研究リソース運営担当
櫛部 淳道	技術研究所 建設材料部 先端材料グループ長

研究員

氏名	所属・役職
櫛部 淳道	技術研究所 建設材料部 先端材料グループ長
小川 孝寿	技術研究所 建設材料部 部長付
菅田 昌弘	技術研究所 新生産システム部 構工法グループ長
井上 泰彦	技術研究所 建設材料部 研究員
水島 靖典	技術研究所 新生産システム部 研究員
青木 和雄	大阪本店 設計部 構造部門 設計課長
大野 正人	大阪本店 設計部 構造部門 設計主任

[再委託先] 研究員のみ  
淡路マテリア株式会社

氏名	所属・役職
杉村 誠一	取締役 工場長 兼 部長
丸山 忠克	開発グループ部長
野村 美樹	テクニカルセンター所長
上田 富弘	テクニカルセンター研究員
木下 幸春	テクニカルセンター研究員
豊田 豪紀	テクニカルセンター研究員
千葉 悠矢	開発グループ研究員

独立行政法人物質・材料研究機構

氏名	所属・役職
中村 照美	元素戦略材料センター 構造体化グループ、グループリーダー
津崎 兼彰	元素戦略材料センター 元素戦略材料センター 招聘研究員
澤口 孝宏	元素戦略材料センター 組織設計グループ、主幹研究員
邱 海	元素戦略材料センター 靱性設計グループ、主任研究員
小林 覚	元素戦略材料センター 構造体化グループ、主任研究員

### 1 - 3 成果概要

研究開発成果の概要は下記のとおりである。詳細は第2章で詳しく述べる。

#### [1] Fe-Mn-Si 系合金母材および溶接材料の作り込み

工業生産性とコスト低減を意識した低品位(低純度)原料を用いた Fe-Mn-Si 系合金を試作し、機械的性質や低サイクル疲労特性について、ダンパーの実用上問題のない優れた性能を発揮できることを明らかにした。また、本合金について製造ロット間で差異の小さい安定した素材製造技術が確立できたことを確認した。

溶接材料について、Fe-Mn-Si 系合金同士および Fe-Mn-Si 系合金と高強度鋼(HT780 鋼)の異材溶接継手に適した同軸複合ワイヤの組成設計と試作を実施し、優れた溶接継手の性能を確認した。また、溶接施工試験から実機制震ダンパーを製作するための溶接条件および熱変形を抑制するための変形拘束条件を最適化した。

#### [2] 溶接部の非破壊検査技術と低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発

Fe-Mn-Si 系合金の超音波探傷に特化した探触子を開発し、H形鋼ダンパーの溶接継手形状に応じた探触子、探傷感度などの最適化を実施し、溶接部の品質管理について超音波探傷の有効性を実証した。

人体に有害な Mn ヒュームを大幅に低減でき、制震ダンパーの断面として想定する H 形鋼の製作を可能とする溶接システムを開発し、十分な実用性を有していることを実施工により確認した。

#### [3] 本技術を用いたメンテナンスフリー制震ダンパーの試作と性能検証

制震ダンパーの形状設計を実施し、試作した。試作した制震ダンパーの動的加力試験を実施し、最大許容変形量  $\pm 2.0\%$ 、最大変形荷重 1000kN 以上の性能を確認した。また、ひずみ振幅  $\pm 1.0\%$  低サイクル疲労試験を実施し、極低降伏点鋼制震ダンパーの3倍程度の疲労寿命を確認した。目標値である従来技術比5倍以上の疲労寿命には達しなかったが、地震を想定したランダム波加力実験により、繰返しのランダム波入力に対しても性能劣化がほとんどない安定した性能を示すことを確認し、長周期地震動に対してメンテナンスフリーのスペックを有する、という本研究の最も重要な目標は達成できた。

#### 1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理機関)

株式会社竹中工務店

(経理担当者)	技術研究所 管理部 研究リソース運営課長		鶴巻 均
	電話：0476-77-1214	FAX:0476-47-3050	
	E-mail:tsurumaki.hitoshi@takenaka.co.jp		
(業務管理者)	技術研究所 建設材料部 先端材料グループ長		櫛部 淳道
	電話：0476-77-1230	FAX: 0476-47-3090	
	E-mail:kushibe.atsumichi@takenaka.co.jp		

(再委託先)

淡路マテリア株式会社

(経理担当者)	取締役 総務経理グループ部長		角村 和哉
	電話：0799 22 1731	FAX:0799 22 1730	
	E-mail:k.tsunomura@awaji-materia.co.jp		
(業務管理者)	取締役 工場長 兼 部長		杉村 誠一
	電話：0799 22 1731	FAX:0799 22 1730	
	E-mail:s.sugimura@awaji-materia.co.jp		

独立行政法人物質・材料研究機構

(経理担当者)	外部連携部門 研究連携室 外部資金チーム長		青木 芳夫
	電話：029-859-2688	FAX:029-859-2500	
	E-mail:AOKI.Yoshio@nims.go.jp		
(業務管理者)	元素戦略材料センター 構造体化グループ グループリーダー		中村 照美
	電話：029-859-2113	FAX:029-859-2101	
	E-mail:NAKAMURA.Terumi@nims.go.jp		

## 第2章 本論

### 2 - 1 Fe-Mn-Si 系合金母材および溶接材料の作り込み

#### 2.1.1.1 Fe-Mn-Si 系合金母材の作り込み

Fe-Mn-Si 系合金母材の量産化とコスト低減を考慮して、低品位原料を用いた量産指向の組成純度である Fe-Mn-Si 系合金母材(低品位材)の試作を完了した(化学組成は非公開)。試作材を図 2.1.1.1 に示す。試作材については外観検査、超音波探傷検査により健全な鋼板であることを確認した。



図 2.1.1.1 試作した実機制震ダンパー仕様幅の Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)

Fe-Mn-Si系合金母材の溶接熱サイクル再現装置(図2.1.1.1.2)により、溶接熱サイクルを $110 \times 11 \times 11\text{mm}$ の試験体を与え、組織変化と硬さ変化を調査した。Fe-Mn-Si系合金(低品位材)の母材組織と溶接模擬材の組織を図 2.1.1.3に示す。ポンド部を模擬するために最高加熱温度を $1200$  に、HAZ部を模擬するために最高加熱温度を $1000$  とした。Fe-Mn-Si系合金(低品位材)の母材については、L方向(圧延方向)、C方向(圧延直行方向)を比較した場合に、結晶粒径や形状にはほとんど違いが認められない。最高加熱温度を $1000$  とした場合には混粒組織(結晶粒径の異なる結晶粒が混在する組織)を示し、C方向の結晶粒の大きさが小さくなった。最高加熱温度を $1200$  としたL方向の試験片では混粒組織(結晶粒径の異なる結晶粒が混在する組織)を示したが、第2相の生成は認められず、C方向の結晶粒が小さくなっている。なお、いずれの試験片においても、オーステナイト結晶粒内には六方晶型の $\epsilon$ マルテンサイトの形成が観察された。

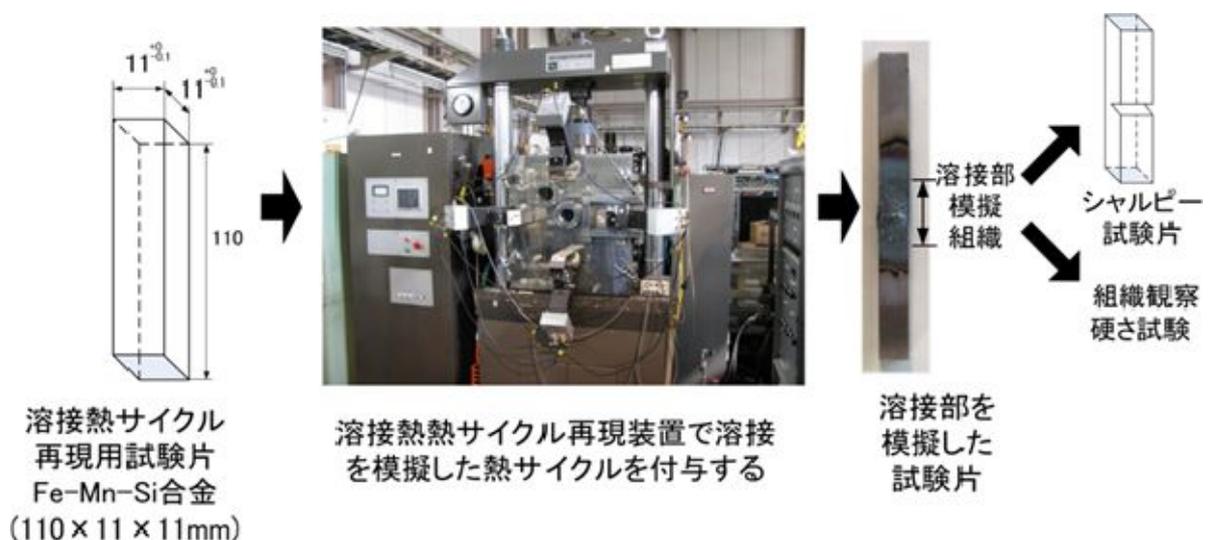


図 2.1.1.2 溶接熱サイクル再現装置

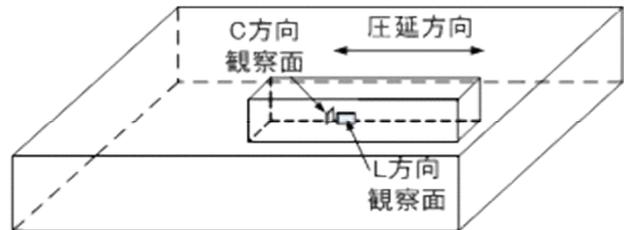
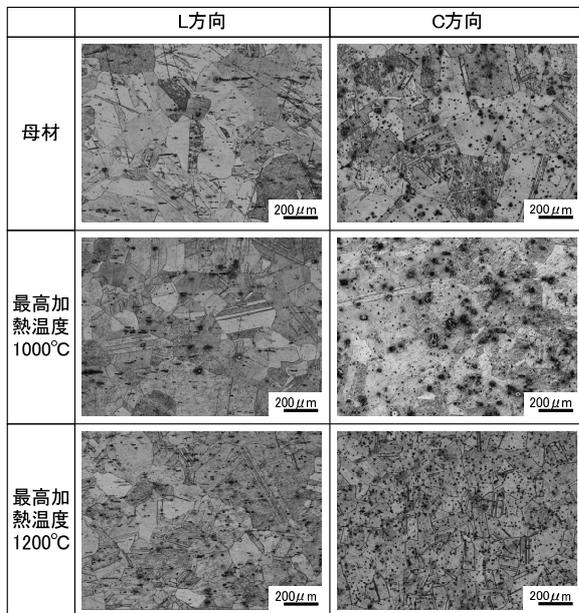


図 2.1.1.3 Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)母材組織と、溶接熱サイクル再現装置により作成した溶接模擬組織の比較

Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)のL方向とC方向について、それぞれ製造ロットの異なる素材を用いて引張試験を実施した。引張試験片はJIS Z 2241 5号に準拠し、平行部の長さは60mm、試験片厚みは16mmである。引張試験は、最大容量1000kNの万能試験機を用いて、室温で試験片が破断するまで静的载荷で実施した。

図2.1.1.4に各結果における応力-クロスヘッド変位の関係を示す。Fe-Mn-Si系合金(低品位材)は明確な降伏点を持たないラウンドハウス型の応力-変位関係を示し、伸び60%以上で安定破壊した。ここで伸び(%)は、試験体平行部に打刻した標点間の距離の変化から測定した値である。また、試験片の破断状況写真を図2.1.1.5に示す。これらの結果から、Fe-Mn-Si系合金(低品位材)の引張諸特性は方向依存性、製造ロット間における変化が小さいことが分かり、安定した素材製造技術の確立を確認した。

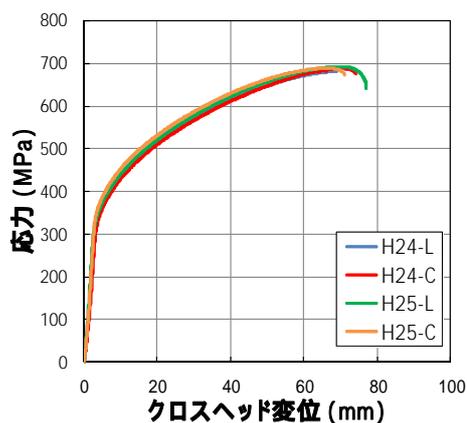


図 2.1.1.4 応力-変位関係

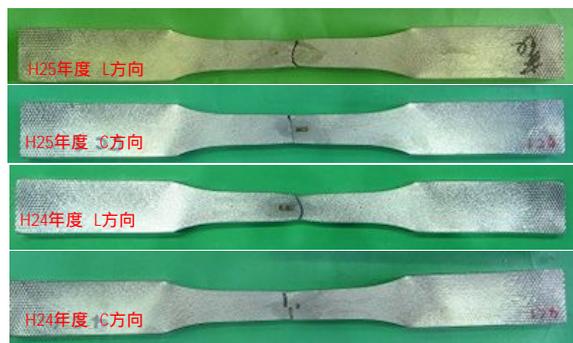


図 2.1.1.5 破断試験片写真

次に、制震ダンパーの使用環境を模擬した条件(温度:  $-20 \sim +40$ 、周波数:  $0.1 \sim 3.0\text{Hz}$ 、ひずみ振幅:  $\pm 0.1 \sim \pm 2.0\%$ )における、Fe-Mn-Si系合金(低品位材)の各種機械的特性を調査した。各試験に用いた試験片は共通して、JIS Z 2274 1号に準拠し、平行部 $\phi 16\text{mm}$ 、直径 $8$ である。

図2.1.1.6にひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ 時における最大ひずみ速度が周波数 $0.1\text{Hz}$ 、 $0.3\text{Hz}$ 、 $0.5\text{Hz}$ 、 $1.0\text{Hz}$ 、 $2.0\text{Hz}$ 、 $3.0\text{Hz}$ に相当するひずみ速度における単調引張試験の応力-クロスヘッド変位関係を示す。Fe-Mn-Si系合金は応力、伸びともに試験周波数による明確な差は見られず、ひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ 時における種々の周波数範囲(ひずみ速度範囲)において、安定した機械的性質を示すことが分かった。

また、制震ダンパーの使用環境を想定し、温度  $-20 \sim +40$  における弾塑性漸増漸減载荷試験を実施した。試験はひずみ振幅条件 $\pm 0.05 \sim \pm 2.0\%$ について引張圧縮交番载荷で実施した。試験は、温度条件を  $-20$ 、 $0$ 、RT(室温)、 $40$  として、加振周波数  $0.33\text{Hz}$  の正弦波で各ひずみ振幅において5サイクルずつ繰返し、途中交換せず1体の試験体で実施した。図 2.1.1.7 に試験結果の一例として、室温、漸増载荷試験結果を示す。この結果から、本合金はひずみ振幅 $\pm 0.1\%$ 程度の小さいひずみ領域から $\pm 2.0\%$ における大ひずみ領域まで引張と圧縮で応力の偏りも少なく、安定したエネルギー吸収が得られる理想的な制震材料としてのポテンシャルを有することが分かる。また、連続5サイクルの加振において、加振中の温度上昇は数度程度であり、履歴ループ挙動がほぼ一定で、エネルギー吸収特性が安定している。温度依存性については、 $-20 \sim +40$  の範囲において低温ほど応力が大きくなる傾向にあり、同一振幅条件において最大20%程度の差が見られた。

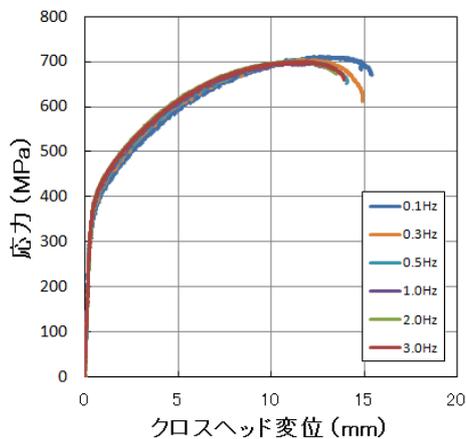


図2.1.1.6 応力-変位関係の周波数依存性

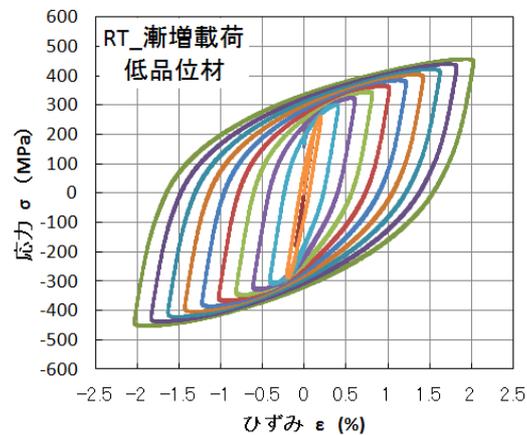


図2.1.1.7 応力-ひずみ関係(室温漸増試験結果)

Fe-Mn-Si系合金(低品位材)についてひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ 、 $\pm 2.0\%$ における破断繰返し数を調査するために、低サイクル疲労試験を実施した。図2.1.1.8に試験状況を示す。試験条件は、軸方向ひずみ制御として、引張圧縮完全両振り三角波で実施した。加振周波数は $0.1\text{Hz}$ 、試験環境は室温大気中とした。

低サイクル疲労試験により得られた破断繰返し数と全ひずみ振幅の片対数関係を図2.1.1.9に示す。 $\pm 1.0\%$ において繰返し数2542回、2577回、 $\pm 2.0\%$ においては784回、1362回での破断を確認した。これらの結果から、Fe-Mn-Si系合金(低品位材)素材は低サイクル疲労領域において優れた疲労特性を示すことを確認できた。



図2.1.1.8 試験状況

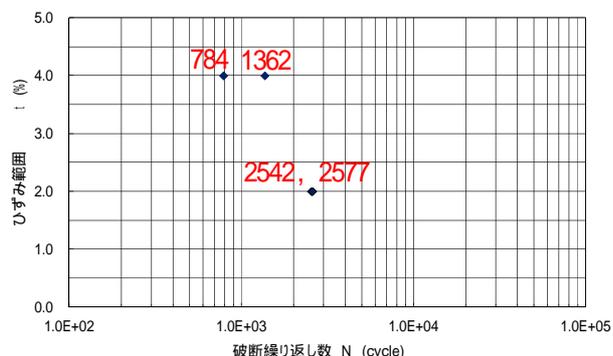


図2.1.1.9 破断繰返し数とひずみ範囲の関係

### 2.1.2 溶接材料の作り込み

Fe-Mn-Si 系合金の溶接材料は高合金系となり高温割れが生じやすい。高温割れ防止を目的とし、シェフラー図を用いて溶接金属の凝固モードが FA モードとなり、Ms 点の温度が室温以上になるような溶接材料の設計を行った。図 2.1.2.1 に示す範囲が溶接金属の適正範囲である。希釈率を 20-30%とし、溶接金属の組成がこの領域に入るような組成として、DW1、DW2、DW3 の 3 種類のソリッドワイヤ(ワイヤ径 1.2mm)を試作した。溶接試験の結果、Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)の同材溶接継手、Fe-Mn-Si 系合金と HT780 鋼との異材溶接継手において溶接割れ等の欠陥が生じることなく溶接施工が可能となった。溶接継手の引張強さが最も高く、優れた疲労特性が得られたのは DW3 を使用した継手であった。そこで、DW3 ワイヤ組成を基準の溶接材料組成とし、Fe-Mn-Si 系合金用の同軸複合ワイヤ設計を行った。

同軸複合ワイヤは、芯線とフープから構成される。マイクロフッシャーや  $-Mn$  などのように溶接継手に悪影響を与える P を母材と同等レベル(30 ppm 程度)に抑えた芯線とフープを真空溶解で試作した。さらに、H 形ダンパーで使用される X 開先や T 形すみ肉継手開先で希釈率が変動しても FA モードに入るように成分設計を行った。ここで考慮した希釈率は、Fe-Mn-Si 系合金-Fe-Mn-Si 系合金の V 開先継手、X 開先継手をカバーできる 5~30%であり、Fe-Mn-Si 系合金-HT780 鋼の V 開先継手、X 開先継手をカバーできる 8~40%である。試作した同軸複合ワイヤ(EW3)の断面を図 2.1.2.2 に、ワイヤの外観を図 2.1.2.3 に示す。

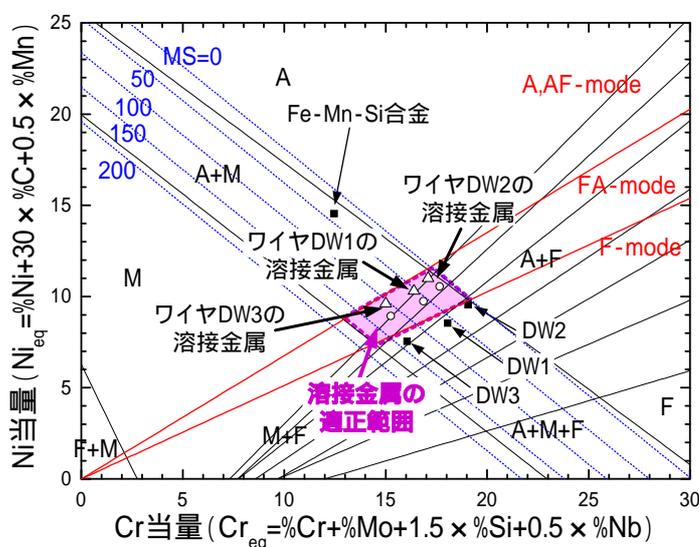


図 2.1.2.1 溶接金属組成の適正範囲

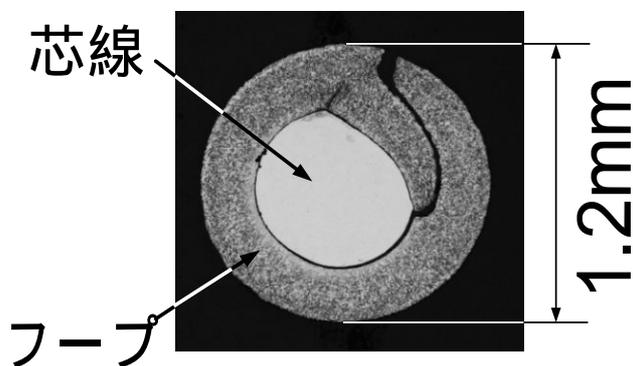


図 2.1.2.2 試作した同軸複合ワイヤの断面



図 2.1.2.3 試作した同軸複合ワイヤ

試作した同軸複合ワイヤ(EW3)を用いて、後述する実機制震ダンパー試験体の溶接部のディテールを再現した Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)の同材溶接突合せ継手および HT780 鋼との異材突合せ溶接継手、Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)同材で材軸平行方向にビードを設けた溶接継手を製作し、引張試験を実施した。

図 2.1.2.4 に溶接部引張試験に用いた試験片形状(JIS Z 3121 1A 号試験片に準拠)を示す。実機サイズダンパー試験体と同様の溶接部形状とし、溶接余盛は除去し、溶接部と母材は同一断面積、板厚は 12mm とした。また、溶接条件は本プロジェクトで開発した溶接機を用いて各種試験により後述する実機サイズダンパー試験体製作に最適化した条件で施工した。

本試験において、母材部と溶接部で変形中のひずみ分布が大きく異なるため、変形全域における応力とひずみの関係をひずみゲージの値から単純に比較することができないため、応力とクロスヘッド変位の関係により評価することとした。図 2.1.2.5 に各試験体における応力-クロスヘッド変位の関係を示す。これらの結果から、いずれの溶接継手においても、脆性的な破壊をすることなく制震ダンパーの変形時に想定される最大応力以上の十分な強度を有することが確認された。Fe-Mn-Si 系合金と HT780 鋼との異材突合せ溶接継手に関しては、Fe-Mn-Si 系合金と比較して高強度である HT780 鋼の弾性変形範囲が広く、ひずみ分担が少ない。このため、塑性変形を担う領域が Fe-Mn-Si 系合金同材溶接突合せ継手よりも小さくなるため、破断時のクロスヘッド変位が小さくなっている。材軸平行ビード試験体については、大きく母材強度を上回る引張強さが確認された。これは、溶接金属の強度が母材強度よりも大きくなっており、その影響を受けているためである。

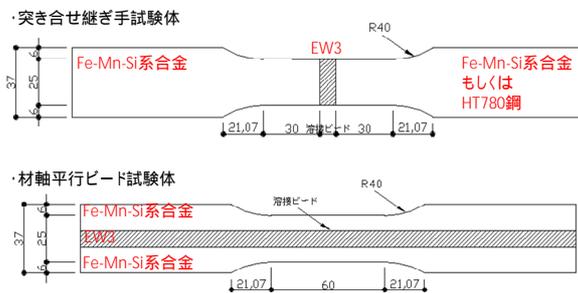


図 2.1.2.4 溶接部引張試験片

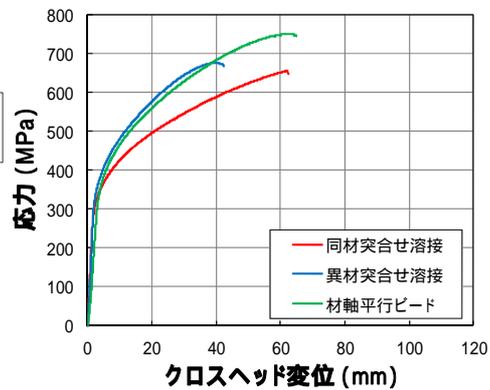


図 2.1.2.5 応力-変位の関係

### 2.1.3 溶接条件の最適化

本プロジェクトで開発するマンガン・ヒューム吸引機能を有する溶接システム(2.2.2 参照)に、前項 2.1.2 で試作する同軸複合ワイヤ(EW3)を用いて、Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)の同材溶接および HT780 鋼との異材溶接を実施した。ここでは、基本条件として V 開先と X 開先について溶接試験を行い、溶接部の衝撃試験により継手特性を評価した。

V 開先で溶接した試験片の外観と溶接ビード断面を図 2.1.3.1 に示す。溶接金属には高温割れや融合不良等の欠陥は認められなかった。溶接継手(a)、(b)について溶接金属の成分を分析し、これをシェフラー図にプロットした結果を図 2.1.3.2 に示す。溶接金属の Cr 当量、Ni 当量は高温割れが生じない適正範囲内にプロットされ、溶接金属には割れは認められなかった。

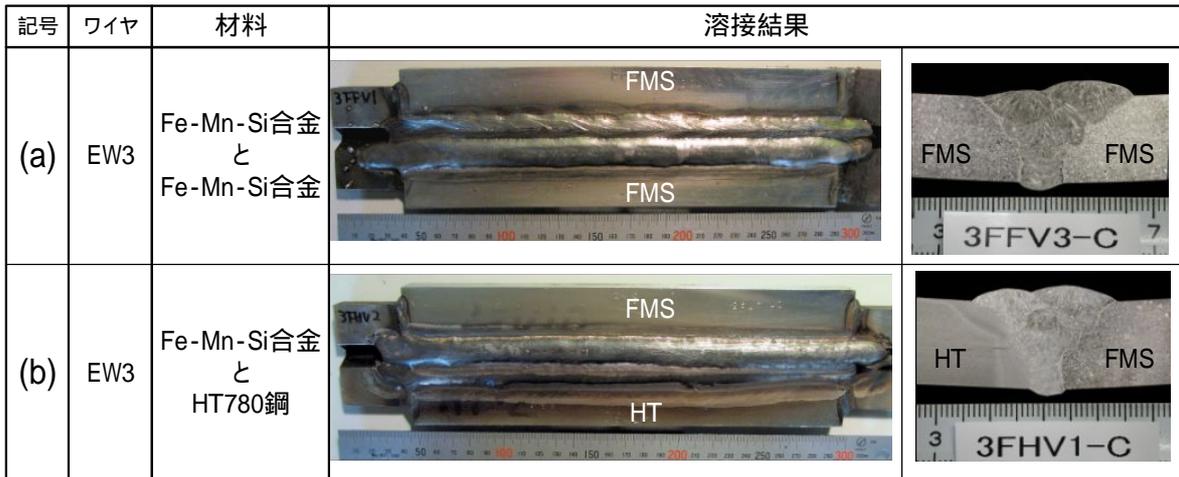


図 2.1.3.1 V 開先溶接継ぎ手と溶接部断面

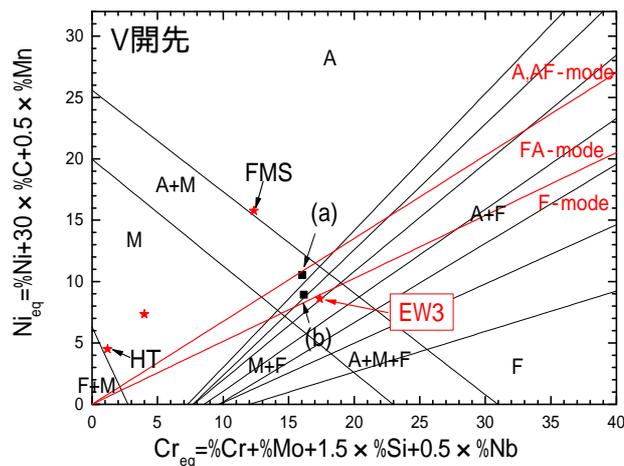


図 2.1.3.2 V 開先溶接金属の分析結果

次に、ダンパー試作で使用される開先形状の基本となる X 開先(開先角度 45° ギャップ 2mm)で溶接した試験片の外観と溶接ビード断面を図 2.1.3.3 に示す。溶接金属には高温割れや融合不良等の欠陥は認められなかった。X 開先の溶接継手(c)、(d)について溶接金属の成分を分析し、これをシェフラー図にプロットした結果を図 2.1.3.4 に示す。ここでは、表側の溶接金属(1 回目の溶接 記号:1)と裏面の溶接金属(2 回目の溶接 記号:2)について成分分析を行った。溶接金属の Cr 当量、Ni 当量は高温割れが生じない適正範囲内にプロットされた。(C)-2 では FA モードの領域より外れているが、大きく外れているわけではなく、実継手の溶接金属には割れは認められなかったので、溶接金属の組成は適正と判断した。

記号	ワイヤ	材料	溶接結果
(c)	EW3	Fe-Mn-Si合金 と Fe-Mn-Si合金	
(d)	EW3	Fe-Mn-Si合金 と HT780	

図 2.1.33 X 開先溶接継ぎ手と溶接部断面

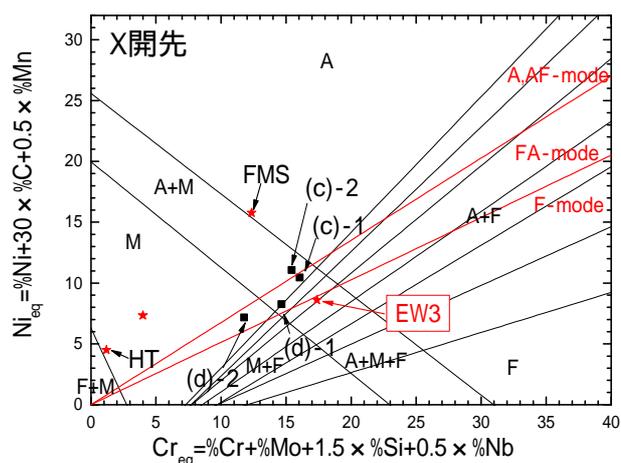


図 2.1.34 X 開先溶接金属の分析結果

試作同軸複合ワイヤ(EW3)を用いて溶接継手を製作した。V 開先溶接継手については溶接金属とボンド部のシャルピー試験片を作製しシャルピー衝撃試験を行った。X 開先についてはボンドの位置にノッチを入れることが困難であるので、溶接金属のみについてシャルピー衝撃試験を行った。

V 開先溶接継手のシャルピー試験結果を図 2.1.3.5 に示す。これらに母材のシャルピー試験結果をプロットした。鉄鋼材料のような遷移温度は認められないが、試験温度の上昇に伴い吸収エネルギーが増加している。試験温度 0 では 70J 以上の吸収エネルギーが得られた。

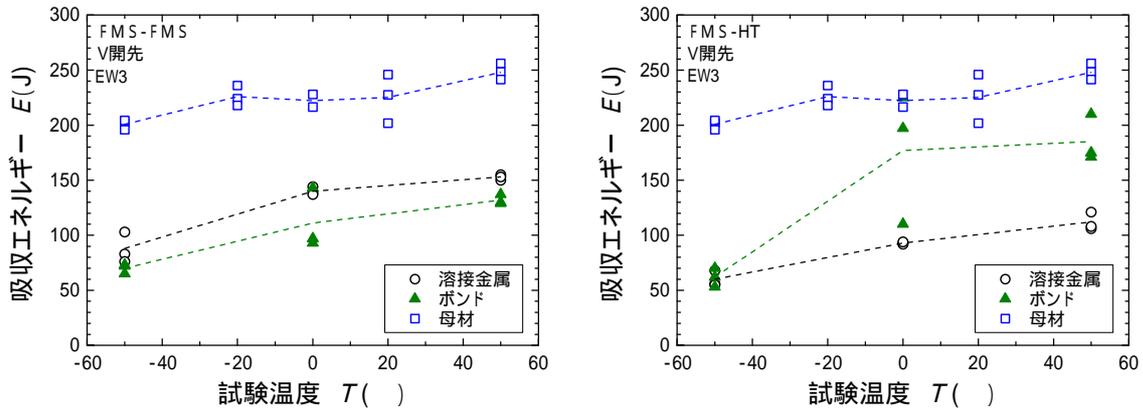


図 2.1.3.5 Fe-Mn-Si 系合金 V 開先溶接継手のボンド部と溶接金属の吸収エネルギー

X 開先溶接継手のシャルピー試験結果を図 2.1.3.6 に示す。これらに母材のシャルピー試験結果をプロットした。Fe-Mn-Si 系合金-Fe-Mn-Si 系合金ではいずれの試験温度でも 140 J 以上の吸収エネルギーが得られた。しかし、Fe-Mn-Si 系合金-HT780 鋼では 0 °C の時に 50 J に低下した。また、Fe-Mn-Si 系合金-Fe-Mn-Si 系合金に比べて吸収エネルギーは 1/2 となった。

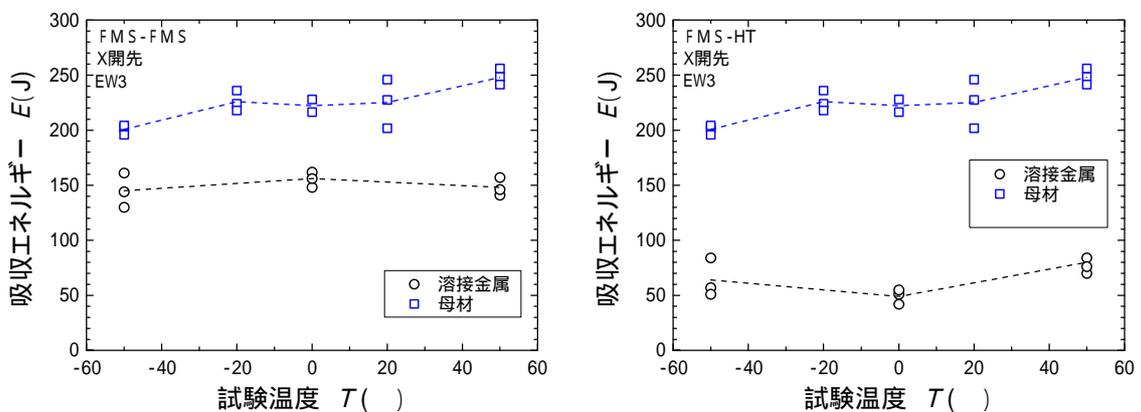


図 2.1.3.6 Fe-Mn-Si 系合金 X 開先溶接継手のボンド部と溶接金属の吸収エネルギー

Fe-Mn-Si 系合金について、溶接継手を作製し、シャルピー衝撃試験により溶接継手の性能を確認することができた。次に、ダンパーの製作上で重要である Fe-Mn-Si 系合金同士および Fe-Mn-Si 系合金と HT780 鋼の突合せ溶接継手について様々な条件での溶接施工を行い、引張試験による特性確認を実施した。

溶接施工条件における引張試験結果から、引張試験の破断形態と溶接時の入熱量との関係性を明らかにし、高品質な継手を製作するための適正な溶接施工条件を確立した。

前述の溶接施工条件を前提に、実機サイズのH形ダンパーを施工する上で、複雑な溶接部ディテールが生じないような溶接順序を考え、基本的な継手である平板の突合せ溶接とT継手溶接の2通りの溶接施工のみで施工できるように単純化した。

そのうえで、溶接時の入熱による変形を防止するために実機サイズのH形ダンパー形状に適合させた溶接変形拘束治具を製作し、実機サイズH形鋼の試作を通じてその有効性を確認した。

拘束治具はH形ダンパーのディテールである a)突合せ溶接と b)T継手溶接部について、溶接施工にあたって開先内仮付溶接は行わないことを前提とし、溶接施工中に移動する溶接トーチがワークと溶接変形拘束治具のそれぞれに干渉しない設計とした。各ディテールにおける溶接変形拘束治具の特徴と施工結果について述べる。

#### a) 突合せ溶接

H形鋼の構成部材であるフランジとウェブは、それぞれ平板状の Fe-Mn-Si 系合金と HT780 鋼の異材継手によって製作する。これらを溶接施工するにあたり、ボルトと鋼材板で適切に押えこむ変形拘束治具を使用して、双方を突合せた状態で固定し、下向き両面溶接の施工をすることにより、溶接部の角変形などの不具合が生じることもなくH形鋼用のフランジとウェブを製作できた。

#### b) T継手溶接

H形鋼は異材突合せ溶接により製作されたフランジとウェブをT形に組み合わせ長手方向に溶接を行って製作する。実機サイズの長尺のフランジとウェブの直角度を維持しながら傘折れや反りとして顕在化する溶接変形を最小化するために、ボルトと固定板、ガイド、ワークを載せる架台を組み合わせた溶接変形拘束治具を使用して、H形鋼を製作した。

図 2.1.3.7 には溶接を完了した H 形鋼の全体外観写真を示す。表 2.1.3.1 には H 形鋼心材部の出来栄寸法の結果を示す。入熱量を制御した最適な溶接条件、実機サイズH形ダンパー形状に適合させた溶接順序および溶接変形拘束治具により、ねらいの寸法精度を満足する実機サイズH形鋼を実現することができ、溶接施工条件を確立した。



図 2.1.3.7 溶接を完了したH形鋼の全体外観

表 2.1.3.1 H形鋼心材部の出来栄寸法

評価項目	基準値	実績値
H形鋼の曲がり	長さの0.15%以下 (1.5mm以下)	1.5mm
H形断面の直角度	フランジ幅の1%以下 (0.85mm以下)	0.6mm

## 2 - 2 溶接部の非破壊検査技術と低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発

### 2.2.1 溶接部の非破壊検査技術の開発

Fe-Mn-Si 系合金の超音波探傷試験に使用する超音波探触子の選定にあたり、下記 a) ~ d) に挙げた用途・条件に対応して有効性が発揮できる探触子の仕様について検討を行なった。

- a) T継手溶接部の健全性評価 …………… 垂直探触子
- b) 突合せ溶接部の健全性評価 …………… 斜角探触子
- c) 制震ダンパーの部材厚さに最適化 …………… 一振動子型, もしくは二振動子型\*
- d) 超音波の減衰が大きい材料での探傷 …………… 広帯域型, もしくは縦波斜角型

注記\*) 二振動子: 交軸点を部材厚さ付近にカスタマイズしたタイプ

本研究開発でターゲットとする制震ダンパーの幾何学的要素や Fe-Mn-Si 系合金に対する探傷適応性等を考慮し、前述 a) ~ d) 項に対応できる探触子として 15 種類の超音波探触子を製作し、後述の評価・試験に使用した。図 2.2.1.1 に製作した超音波探触子の写真、図 2.2.1.2 に超音波特性評価システムの写真を示す。



図 2.2.1.1 製作した超音波探触子

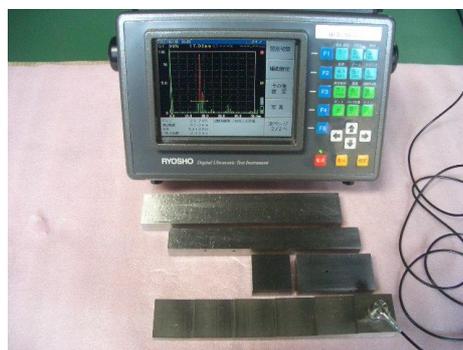


図 2.2.1.2 超音波特性評価システム

Fe-Mn-Si 系合金の超音波特性に関する知見は既往の文献から得られないため、製作した超音波探触子を用いて Fe-Mn-Si 系合金の超音波特性の評価を実施し、音速、減衰、音速異方性などの基本的な超音波特性を把握した。これらの結果から、Fe-Mn-Si 系合金の内部傷の評価については、通常の JIS 標準試験片との比較による方法ではなく、超音波減衰の影響を受けにくいデシベルドロップ法の適用が適切であると判断した。

人工スリットに対する(相対的な)探触子の移動と反射エコー高さの変化と試験状況の例を図 2.2.1.3 に示す。図中に、人工スリットのエコー反射面の大きさと反射エコーのピーク高さから 6dB ドロップ法を適用した場合の指示長さ(実幅)と人工スリットの実幅を記述している。結果から、人工スリットの反射面の実サイズに対して指示長さが大きくなり、安全側の指示値を示すことを確認した。

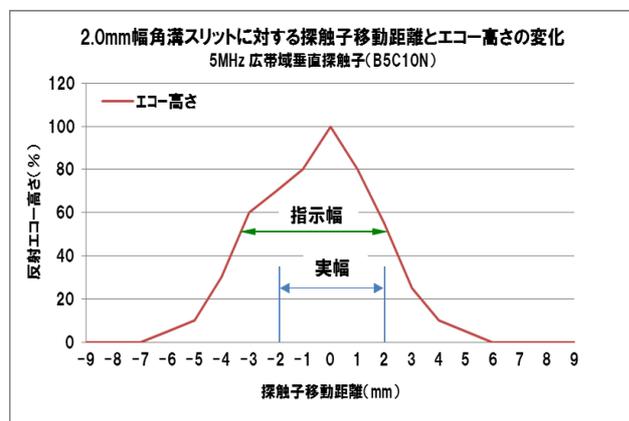


図 2.2.1.3 人工スリットに対する(相対的な)探触子の移動に伴う反射エコー高さの変化と試験状況の例

Fe-Mn-Si 合金の実機H形鋼制震ダンパーの各溶接部ディテールに対する超音波探傷試験方法を確立するために、a) Fe-Mn-Si 系合金とHT780 鋼の突合せ異材溶接部 b) T 継手部のそれぞれについて欠陥指示長さ測定方法の有効性の検証を行った。

a) Fe-Mn-Si 系合金とHT780 鋼の突合せ異材溶接部の欠陥指示長さ測定方法の検証

Fe-Mn-Si 系合金の減衰特性を考慮して広帯域斜角探触子を使用して、Fe-Mn-Si 系合金とHT780 鋼の突合せ異材溶接部の放射線透過試験(RT)で検出した溶け込み不良指示長さ超音波斜角探傷(UT)でデシベルドロップ法を適用して求めたきず指示長さとを比較評価した。実機サイズのH形鋼の突合せ溶接部に対して斜角探傷法を適用している事例を図2.2.1.4に示す。使用した溶接試験体と内在する溶け込み不足の測定結果を表2.2.1.1に示す。結果から、探触子の振動子サイズ 10mmを超える長さを有する内在欠陥については、6dBドロップ法を適用すれば+50%以内の精度で欠陥指示長さを評価することができ、H形鋼のフランジの突合せ溶接部及びH形鋼のフランジ間の内側に位置するウェブの溶接部に対しても探傷が可能であることを確認した。

表 2.2.1.1 RTとUTそれぞれで測定した溶け込み不足指示長さの比較

		溶け込み不足[A]	溶け込み不足[B]	溶け込み不足[C]
RT 指示長さ		15.0mm	13.0 mm	16.5mm
UT 指示長さ	測定値	21.0mm	14.0 mm	19.0mm
	精度	+40%	+8%	+15%

注記: RT:放射線透過試験(X線) UT:超音波探傷試験



図 2.2.1.4 実機サイズ H 形鋼における突合せ溶接部の斜角探傷法の実施状況

b) T 継手不溶着部の指示長さ測定条件検証

Fe-Mn-Si 系合金の T 継手隅肉溶接部の不溶着部の幅を超音波垂直探傷のデシベルドロップ法によって測定し、実寸法と比較評価した。二振動子型垂直探触子を使って T 継手隅肉溶接部の不溶着部幅を測定した結果を表2.2.1.2に示す。使用する垂直探触子に応じた適切な感度設定によるデシベルドロップ法を適用することによって実寸法に近い精度で不溶着部の寸法を評価することが確認できた。実機サイズH形鋼のT継手隅肉溶接部における不溶着幅を垂直探傷法で測定した事例を図2.2.1.5に示す。本研究開発でカスタマイズした垂直探触子を使用すれば超音波の減衰や探傷面の形状変化による影響を最小化して溶接部のきず、不溶着部の幅の寸法評価が可能であり、目標の精度で T 継手部を探傷できることが確認された。

表 2.2.1.2 設定感度毎の不溶着部指示長さ

探触子:5C10/2NDF10		T形隅肉溶接試験片	
		9.0mm箇所	8.0mm箇所
指示長さ	(基準感度) 49.5 dB時	4.0mm	6.0mm
	(6dBアップ感度) 55.5 dB時	9.0mm	8.0mm
	(12dBアップ感度) 感度61.5 dB時	10.0mm	10.0mm



図 2.2.1.5 実機サイズ H 形鋼の T 継手溶接部にある不溶着部幅の測定状況

## 2.2.2 低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発

Fe-Mn-Si 系合金溶接時に発生する人体に有害な高マンガン・ヒュームの作業環境への飛散を防止し、作業員の健康に配慮した溶接作業環境を実現するため、このヒューム吸引機能を有する溶接機の開発を実施した。これまで、Fe-Mn-Si 系合金のような高マンガン鋼の溶接ニーズが少なく、高マンガン・ヒューム吸引機能のある溶接機は存在しないので、本研究開発において初めて試作した。さらに、制震ダンパーの幾何学的要因で生じる緩衝などの障害回避を実現する吸引部の寸法形状を検討して、図 2.2.2.1 に示す高マンガン・ヒューム吸引機能を有する溶接システムを設計・開発した。



図 2.2.1 開発した Fe-Mn-Si 系合金用の溶接システム

開発溶接システムを再委託先の淡路マテリア(株)の洲本工場に設置して実用性評価を行った(図 2.2.2.2)。溶接システムの基本動作を確認し各種調整を行った結果、図 2.2.2.3 に示すように H 型部材を溶接で製作できることを実証した。



図 2.2.2 洲本工場に設置した溶接システム



図 2.2.3 溶接システムで試作した H 型部材

上記の開発溶接システムの溶接施工実績から、溶接ワイヤの巻きクセや溶接進行に伴ってワーク上に現れる溶接変形は、溶接アーク状態、ワイヤ送給の安定性および溶接ねらい位置への追従に大きく影響を与えることを把握した。これらの対策として開発溶接システムに、ワイヤの巻きクセを矯正して送給低減を軽減し、安定した溶接アーク状態を確保するために、溶接ワイヤ供給装置の導入と溶接変形が生じた場合であっても溶接線に沿って現物放いしながら溶接トーチとのずれを検知・補正し、安定した溶接ビードを実現するために溶接放い装置の導入をそれぞれ実施した。溶接ワイヤ矯正装置の設置状況を図 2.2.2.4 に、溶接放い装置を設置して T 継手溶接を施工する状況を図 2.2.2.5 に示す。

溶接ワイヤ矯正装置を設置して施工した溶接ビードの状況を図 2.2.2.6 と図 2.2.2.7 に示す。両継手ともビード蛇行や起伏などの乱れた様子もなく良好な溶接ビードが得られ、溶接ワイヤ矯正装置設置の有効性が確認された。溶接放い装置を取り付けて T 継手隅肉溶接を行った際の溶接部の外観を図 2.2.2.8 に示す。試験の結果、溶接アークの挙動も安定し、かつ外観品質として良好な溶接ビードが得られたことから溶接放い装置の有効性が確認された。

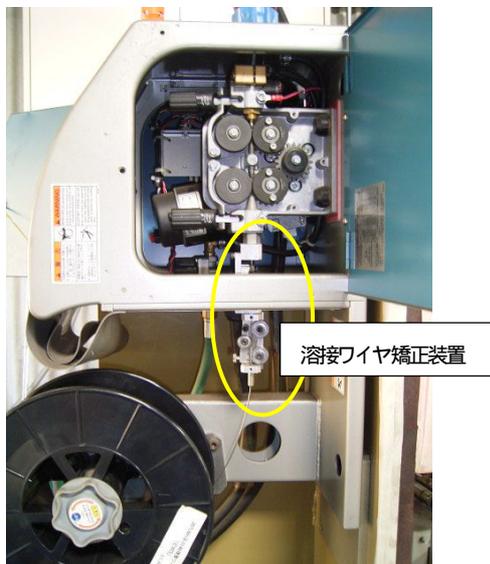


図 2.2.2.4 溶接ワイヤ矯正装置取付状況



図 2.2.2.5 溶接放い装置を設置し、T 継手溶接施工状況



図 2.2.2.6 溶接ワイヤ矯正装置を使用して溶接施工した T 継手長手溶接の事例



図 2.2.2.7 溶接ワイヤ矯正装置を使用して溶接施工した突合せ継手溶接の事例



図 2.2.2.8 溶接放い装置を使用して施工した T 継手試験体

以上の検討結果をもとに、2.3.1 項で詳述する実機サイズ H 形鋼の溶接施工を実施した。スパッタの発生状態、アークの安定状態、溶接トーチ拳動など溶接時の施工状態の確認と、溶接ビードの蛇行の有無、凹凸やピットの発生など溶接ビードの外観品質を評価し、改良を加えた溶接システムの実用性を調査した。

H形鋼の試作を通じて確認した結果を表 2.2.2.1 に示す。総合評価としては本プロジェクトで開発した溶接システムは、Fe-Mn-Si 系合金(低品位材)を使用したH形鋼の製作に対して実用性を有することが確認された。

表 2.2.2.1 H形鋼の製作を通じて確認したチェックポイントと評価結果

継手の種類	材料の組合せ	アークの状態	溶接トーチ拳動	スパッタの発生状態	溶接ビード			
					蛇行	形状	表面性状	不完全部の発生 <sup>*4</sup>
突合せ継手	FMS(低品位材) - HT780	安定	安定	ほとんど発生しない <sup>*1</sup>	生じない	若干の偏りが生じる <sup>*3</sup>	適正	生じない <sup>*5</sup>
T継手	FMS(低品位材) - HT780	安定	安定	ほとんど発生しない <sup>*1</sup>	生じない	若干の偏りが生じる <sup>*3</sup>	適正	生じない <sup>*5</sup>
	FMS(低品位材) - FMS(低品位材)	安定	安定	ほとんど発生しない <sup>*1</sup>	生じない	適正	適正	生じない
	HT780 - HT780	安定	安定	発生する <sup>*2</sup>	生じない	適正	適正	生じない

<注記解説>

\*1: スパッタ発生頻度は少なく、発生した場合でも粒径は 0.5mm 以下の小さいもので除去も容易である。

\*2: スパッタの発生が多く、スパッタが付着する。溶接丘傍面へのスパッタ付着防止剤の塗布によりスパッタ付着の軽減と除去の容易化を図る対策を実施

\*3: 常磁性の FMS 材と強磁性の HT780 との磁性差によって、溶接金属が HT780 側に僅かに偏り場合がある。

\*4: アンダーカット、オーバーラップなどを指す

\*5: \*3 の要因によってアンダーカットに近い状態を生じることがあるので外観検査が必要

## 2 - 3 本技術(溶接・非破壊検査技術)を用いたメンテナンスフリー制震ダンパーの試作と性能検証

### 2.3.1 メンテナンスフリー制震ダンパーの試作

溶接施工性に配慮すると共に、十分な局部座屈耐性を有し、長周期地震動用制震ダンパーとして、市場で汎用的になりつつある減衰力1000kN以上の大きな減衰力が得られるビルドH形鋼タイプ制震ダンパーのH形断面形状の設計を実施した。

H形断面の設計は座屈補剛制震ブレースが塑性変形時に耐力低下を生ずることなく安定したエネルギー吸収能力を発揮することができるように、必要最大塑性率がフランジとウェブそれぞれの保有塑性率を超えないように幅厚比を設定する。保有塑性率判定を満足するH形断面の中から、溶接施工性に配慮して、ウェブ高さを可能な限り高くし、溶接金属の溶け込み量および製造板材厚を考慮して最適なH形断面を設計した。

図2.3.1.1にFe-Mn-Si系合金(低品位材)を材軸方向に引張圧縮変形によりエネルギーを吸収するH形鋼の芯材に用いた実機サイズ制震ダンパー試験体の図面を示す。芯材のH形断面はH-125×85×12×12(芯材断面積3252mm<sup>2</sup>)とし、大地震時にダンパーのひずみ振幅が±1.0%生じたとき、減衰力が1000kN以上発生する制震ダンパーとして設計した。また、Fe-Mn-Si系合金(低品位材)を用いたフランジ長さは、1250mmとし、制震ダンパーとして実際に建築物に設置可能な長さとした。

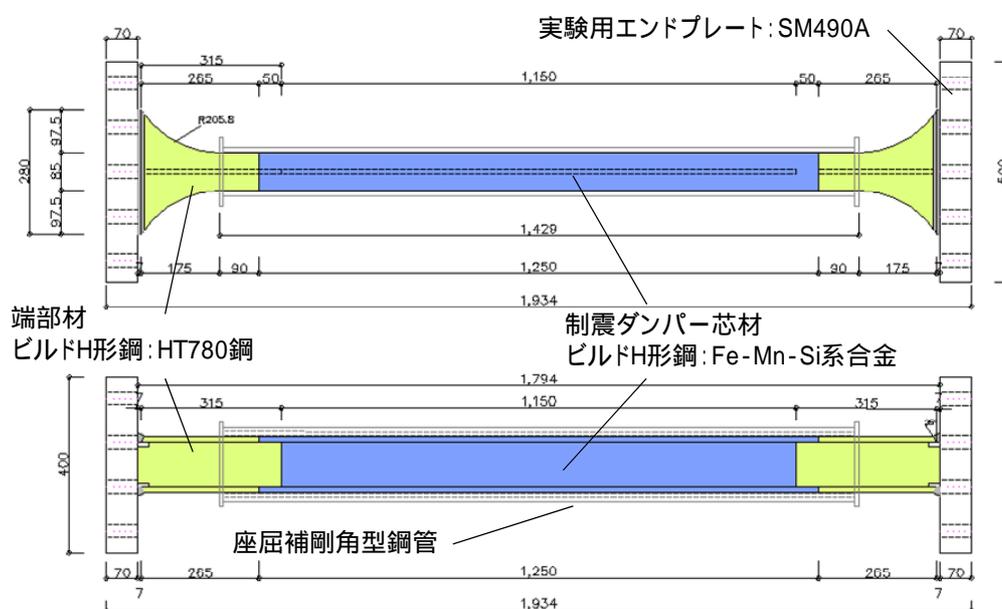


図2.3.1.1 Fe-Mn-Si系合金制震ダンパー試験体図面

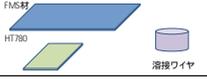
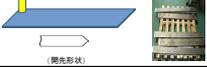
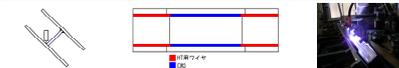
Fe-Mn-Si系合金H形鋼芯材の端部は、高強度鋼HT780同断面のビルドH形鋼を用いている。座屈対策については、図に示すようにH形鋼に対して、適切なクリアランスを取り、座屈補剛用の角型鋼管(溶接組立BOX)にて座屈補剛しており、無補剛区間降伏条件、局部座屈条件、曲げ応力の確認などを実施し、繰返し変形における圧縮変形時の座屈を効果的に防止し、圧縮、引張変形時の力学的性能がほぼ同等で安定した性能が得られるよう設計している。図2.3.1.2に試作した実機サイズ制震ダンパーの写真を示す。芯材を規定の製作精度内に製作し、変形クリアランスを確保した状態で補剛管溶接施工を実施できた。



図2.3.1.2 Fe-Mn-Si系合金制震ダンパー試験体

実機サイズのH形鋼の試作を通じて一連の施工工程において、溶接施工に影響を与える諸要素を確認し、表2.3.1.1に示す「H形断面制震ダンパー製作工程管理表」にまとめた。

表 2.3.1.1 H形断面制震ダンパーの製作工程管理表

	工程名/概要	管理対象	基準・方法	品質基準	使用設備・機材	要員
1	材料発注 	FMS材 HT780 溶接ワイヤ	仕様書 発注書	仕様書・発注書による		購買担当
2	材料入荷・受入検査 	FMS材 HT780 溶接ワイヤ	納品書照合 外觀・寸法 超音波探傷 試験	協定仕様書による	コンベックス、Jギス 超音波探傷器 垂直深触子 斜角探触子	受入検査員 品質検査員 UT有資格者
3	切断 / 切り出し 	FMS材 HT780	切断寸法	基準寸法 ± 0.5mm	プラズマ切断機 ガス切断 バンドソー	加工技能者
4	FMS材板厚t16へ 部分減厚加工 FMS-HT780突合せ 溶接部開先加工 	FMS材 HT780	開先形状	基準寸法 ± 0.5mm 基準角度 ± 0.5°	NCフライス 横中グリ盤	機械 オペレーター
5	突合せ溶接用 エンドタブ取り付け 	FMS材 HT780	溶接条件	溶接指示書による	半自動MIG溶接機	溶接技能者
6	HT-FMS材 突合せ溶接 	FMS材 HT780	拘束治具 溶接条件	溶接指示書による	自動MIG溶接機	溶接技能者
7	切削加工時固定用 エンドタブ取り付け 	突合せ 溶接材	溶接条件	溶接指示書による	半自動MIG溶接機	溶接技能者
8	反り・曲がりの 工程内検査 (必要に応じて) 矯正 	突合せ 溶接材	溶接至量	部材至量管理値による	直尺、目視 油圧プレス	品質検査員 加工技能者
9	減厚加工 (t16 t12) 形状加工 	突合せ 溶接材	部材寸法	基準寸法 ± 0.5mm	マシニングセンター	機械 オペレーター
10	浸透探傷試験 (突合せ溶接) 	突合せ 溶接材	溶接欠陥	非破壊検査手順書による	浸透探傷試験機材	PT有資格者
11	ウェブ開先加工 	ウェブ 溶接材	開先形状	基準寸法 ± 0.5mm 基準角度 ± 0.5°	横中グリ盤	機械 オペレーター
12	反り・曲がりの 工程内検査 (必要に応じて) 矯正 	突合せ 溶接材	溶接至量 部材寸法	部材至量管理値による	直尺、目視 油圧プレス	品質検査員 加工技能者
13	組立 (拘束治具への部材 のセッティング) 	突合せ 溶接材	拘束治具	部材取付位置、角度	拘束治具	加工技能者 溶接技能者
14	T継手長手溶接 (ワーク形状: T形) 	T形溶接鋼	溶接条件	溶接指示書による	自動MIG溶接機	溶接技能者
15	組立 (拘束治具への部材 のセッティング) 	T形溶接鋼	拘束治具	部材取付位置、角度	拘束治具	加工技能者 溶接技能者
16	T継手長手溶接 (ワーク形状: H形) 	H形溶接鋼	溶接条件	溶接指示書による	自動MIG溶接機	溶接技能者
17	反り・曲がりの 工程内検査 (必要に応じて) 矯正 	H形溶接鋼	溶接至量 部材寸法	部材至量管理値による	直尺、目視 油圧プレス	品質検査員 加工技能者
18	(H形鋼)フランジ 端面開先加工 	H形溶接鋼	開先形状	基準寸法 ± 0.5mm 基準角度 ± 0.5°	横中グリ盤	機械 オペレーター
19	浸透探傷試験 	H形溶接鋼	溶接欠陥	非破壊検査手順書による	浸透探傷試験機材	PT有資格者
20	仕上げ 	H形溶接鋼	グラインダー フラップホ イール	寸法検査要領書による	グラインダー フラップホイール	加工技能者
21	超音波探傷試験 	H形溶接鋼	溶接欠陥	非破壊検査手順書 による	超音波探傷器 垂直深触子 斜角探触子	UT有資格者
22	完成品検査 	H形溶接鋼	形状・寸法	寸法検査要領書による	直尺、コンベックスル ール、スコヤ テーパージェジ すきまゲージ	品質検査員

### 2.3.2 制震ダンパーの性能検証

試作した実機サイズダンパー試験体の性能検証として荷重-ひずみ関係を確認するために、正弦波入力による加力試験を実施した。前述の図 2.3.1.2 に本試験に用いた試験体写真を示す。Fe-Mn-Si 系合金芯材部は、H-125×85×12×12 断面で、フランジ長さは 1250mm である。Fe-Mn-Si 系合金同士および Fe-Mn-Si 系合金と HT780 鋼との異材溶接部には同軸複合ワイヤ EW3 を用いている。

試験は実機サイズダンパー試験体を、大型アクチュエータ(最大荷重 2000kN)と反力トラスに固定し、アクチュエータにより試験体軸力方向に強制変位を与えることにより実施した。

図 2.3.2.1 に試験実施状況写真を示す。加力はアクチュエータの変位制御で行い、その際レーザー変位計でそれぞれ計測した試験体全長の変位を芯材フランジ長さ 1250mm で除することによりひずみを算出している。荷重はアクチュエータのロードセルから計測した。加力試験は振動数 0.33Hz の正弦波入力で、ひずみ振幅 $\pm 0.05 \sim 2.0\%$ の 12 水準のひずみ振幅で小さいひずみから順番に加力した。

図 2.3.2.2 に加力試験において得られた荷重-ひずみ関係を示す。各加力ステップにおいて連続 3 サイクルのデータを示している。実機サイズダンパー試験体は加力中にループ形状が変化することなく、小変形からひずみ $\pm 2.0\%$ の大変形領域まで変形を許容することを確認した。また、最大ひずみ $\pm 2.0\%$ 時には、1500kN 以上、 $\pm 1.0\%$ 時においても、1200kN 以上の最大荷重を発揮する。



図 2.3.2.1 試験実施状況

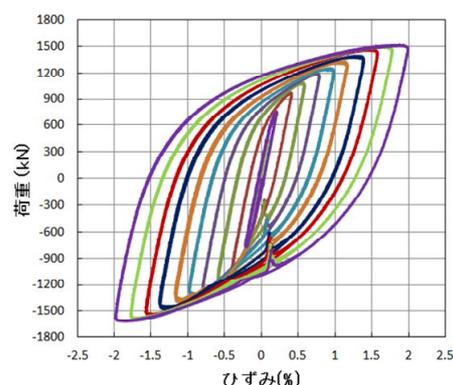


図 2.3.2.2 荷重-ひずみ関係(漸増載荷)

次に、試作した実機サイズダンパー試験体の低サイクル疲労特性の性能検証として、ひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ 低サイクル疲労試験を実施した。試験体および加力システムは上で示した内容と同様である。試験条件は振動数 0.33Hz、ひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ の正弦波加力とした。

ひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ 低サイクル疲労試験による各試験体の破断繰返し数は、317 回(試験体 No.1)、276 回(試験体 No.2)、274 回(試験体 No.3)となった。試験体 No.1～No.3 による破断繰返し数の差は小さく、安定した疲労耐久性を確認した。本試験により、Fe-Mn-Si 系合金制震ダンパーは極低降伏点鋼(LY100)制震ダンパーにおけるひずみ振幅 $\pm 1.0\%$ 低サイクル疲労試験結果(100 回程度)の 3 倍程度の疲労特性を有することが確認された。

試作した実機サイズダンパー試験体の低サイクル疲労特性の性能検証として、地震を想定したランダム波入力加振による耐久性評価を実施した。

地震を想定したランダム波入力に対する制震ダンパーの性能を確認するために、図 2.3.2.3 に示す 2 つのランダム波形をそれぞれ試験体に入力した。ランダム波1は短周期成分が多い波形であり、ランダム波2は長周期成分が多い波形として設定した。それぞれの入力波について大地震と中規模地震を想定して、図 2.3.2.3 に示すそれぞれの波形に対して LV2(100%波形)と LV1(LV2 波形のひずみを 50%に減じた波形)の 2 種類の入力波を加力条件として、表 2.3.2.1 に示す加力ステップの順序で試験を実施した。

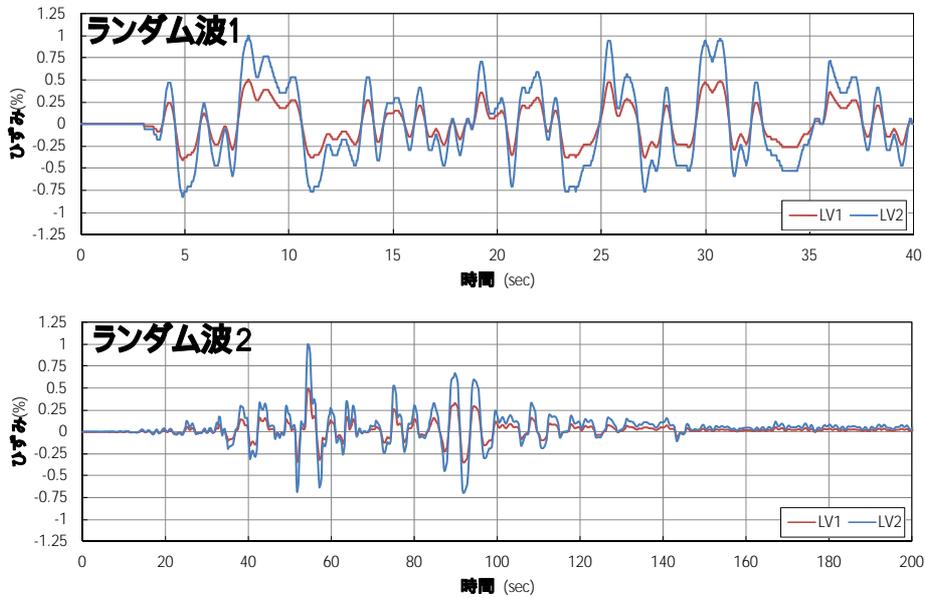


図 2.3.2.3 入力地震波

表 2.3.2.1 加力条件

試験 No.	入力波	加力順序					
		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6
1	ランダム波 1	LV1_1 (50%)	LV2_1 (100%)	LV2_2 (100%)	LV1_2 (50%)	LV1_3 (50%)	LV2_3 (100%)
2	ランダム波 2	LV1_1 (50%)	LV2_1 (100%)	LV2_2 (100%)	LV1_2 (50%)	LV1_3 (50%)	LV2_3 (100%)

図 2.3.2.4 に例としてランダム波1を入力波として加力した Step 1 および Step 2 におけるの荷重-ひずみ関係を示す。小ひずみから大ひずみ領域まで幅広く荷重-ひずみループを描き、大きな弾塑性ひずみエネルギー吸収能力が確認された。

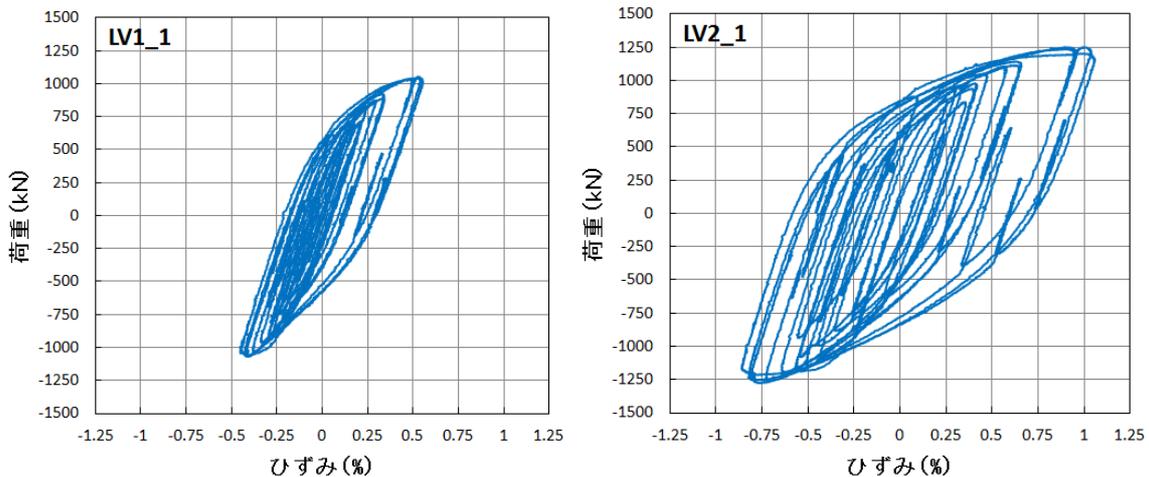


図 2.3.2.4 荷重-ひずみ関係

(ランダム波1入力時 左図:LV1 入力時(Step 1)、右図:LV2 入力時(Step 2))

図 2.3.2.5、図 2.3.2.6 にランダム波1、ランダム波2を表の加力条件に従って入力した際のそれぞれの荷重時刻履歴関係を波形の大きさレベル(LV)ごとにまとめて示す。LV2 波入力の結果は、ランダム波1とランダム波2ともにそれぞれの3回の入力波に対する発生荷重がほとんど同様となり、性能の変化がほとんどなく安定した性能を

示すことが確認された。一方、LV1 波入力の結果は、LV2 波を経験する前後でほとんど発生荷重が変わらず、小ひずみ領域においても安定した性能を示すことが確認された。

地震を想定したランダム波を繰返し入力して得られたこれらの結果より、本制震ダンパーは、従来技術である極低降伏点鋼(LY100)制震ダンパー比約3倍の現状性能の発揮にとどまる(目標値は5倍)が、それでも長周期地震動に対して初期性能を維持し、十分な安全性が確保できるレベルに達していることを確認できた。

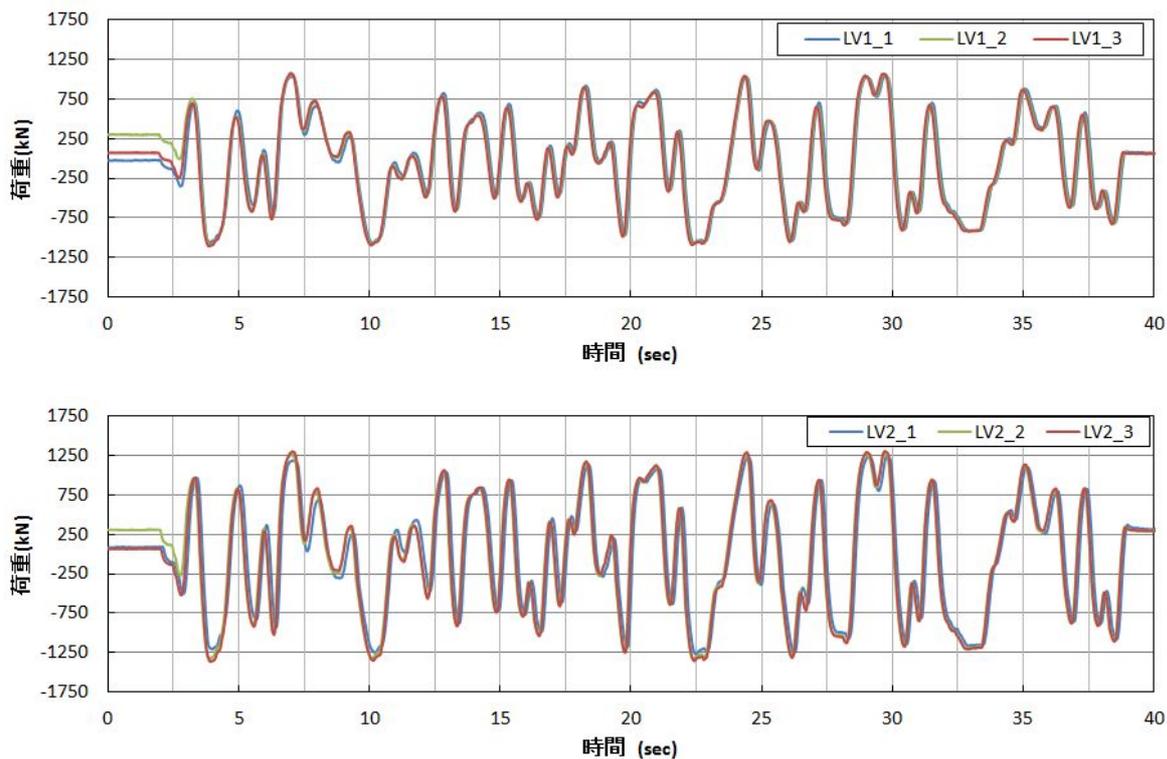


図 2.3.25 荷重時刻歴関係(ランダム波1入力時)

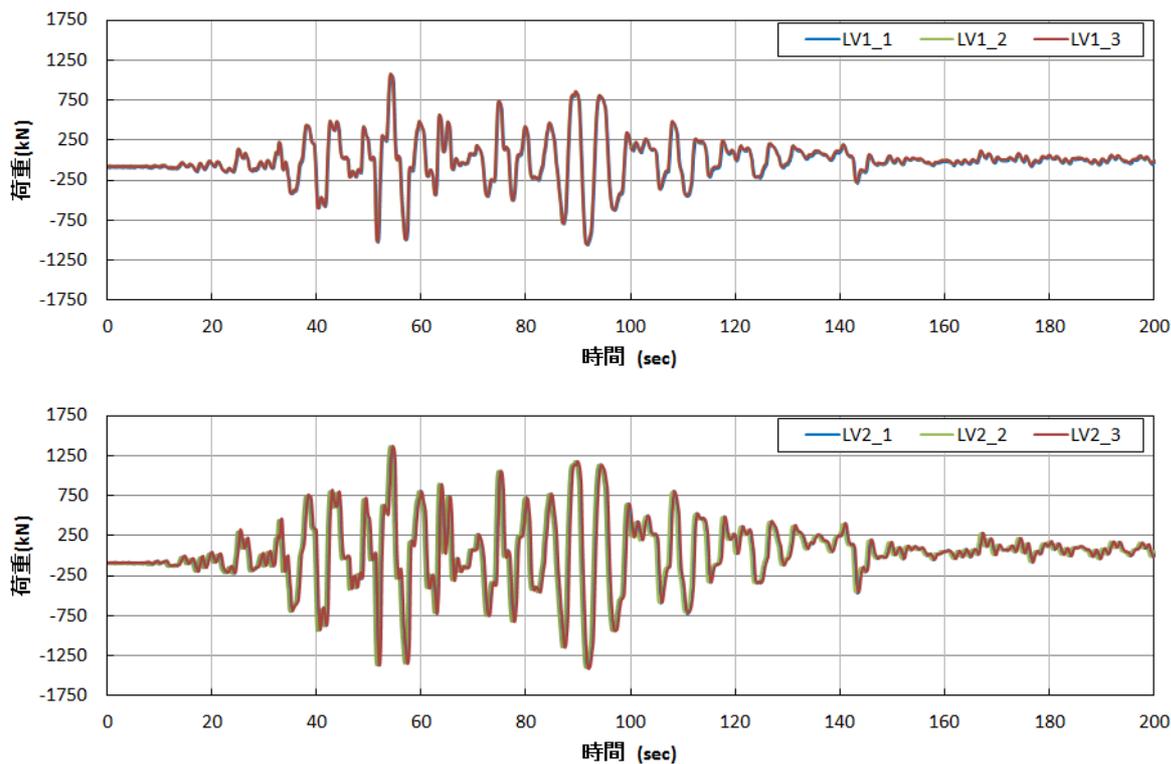


図 2.3.26 荷重時刻歴関係(ランダム波2入力時)

## 最終章 まとめと今後の方針

最終目標である「長周期地震動にも対応できる建築用超高性能メンテナンスフリー制震ダンパーを実現するための溶接・非破壊検査技術の開発」の達成に向けて、必要とされる各要素技術について具体的なサブテーマを設定し、サブテーマで行う実施項目ごとに具体的な目標値を設定して精力的に取り組んできた。

事業管理機関である(株)竹中工務店と、再委託先である淡路マテリア株式会社、独立行政法人物質・材料研究機構との研究上の役割分担や連携状況も良く機能し、本報告書に記載の通り、ほとんど全ての目標値を達成することができた。

以下では、各研究テーマについて、研究成果をまとめ、今後の課題の概要を示して本報告書の結びとする。

### 3 - 1 Fe-Mn-Si 系合金母材および溶接材料の作り込み

#### 3.1.1 Fe-Mn-Si 系合金母材の作り込み

Fe-Mn-Si 系合金の作り込みに関して、従来の高純度な原材料を用いた高品位材に代わり、工業生産性とコスト低減を意識した低品位(低純度)原料を用いた合金を試作し、機械的性質や低サイクル疲労特性についてダンパーの実用上問題のない優れた性能を発揮できることを明らかにした。また、低品位(低純度)原料を用いた合金について、工業的な製造プロセスによる品質安定性を確認するために、製造ロットの異なる母材と引張強度諸特性を比較した。これにより、製造ロット間で差異の小さい安定した素材製造技術が確立できたことを確認した。

#### 3.1.2 溶接材料の作り込み

実機 Fe-Mn-Si 系合金制震ダンパー製作に使用するために適正化した同軸複合ワイヤの組成設計とワイヤ試作を実施した。また、試作ワイヤを用いて実機ダンパー製作に実際に用いられるディテールである溶接継手について、溶接部引張試験を実施し、優れた溶接継手の性能を確認した。

さらに、母材および溶接材料の作り込みの結果得られた研究成果に関して特許出願を行った。

(特願 2014-026400 発明名称:FMS 鋼用溶接ワイヤおよび溶接継ぎ手)

#### 3.1.3 溶接条件の最適化

実機サイズの H 形鋼制震ダンパーを製作する上で、良好な溶接継手の実現と溶接による熱変形を抑制し、ダンパーを所定の寸法精度内に製作するという観点から、溶接時の入熱量とダンパー製作における変形拘束方法を最適化した。

### 3 - 2 溶接部の非破壊検査技術と低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発

#### 3.2.1 溶接部の非破壊検査技術の開発

Fe-Mn-Si 系合金に特化した探触子を開発し、本合金の減衰特性、音速異方性、伝播経路異方性等の超音波特性を明らかにした。これらの知見に基づき、実機サイズ H 形鋼ダンパーの溶接継手形状に応じた探触子、探傷感度などの最適化を実施した。これらの検証を実施し、実機サイズの制震ダンパーの製作過程における溶接部の品質管理のための超音波探傷の有効性を実証した。今後、制震ダンパーの商用化における品質保証を念頭においたより精緻な検査基準の策定に取り組む。

#### 3.2.2 低ヒューム作業環境を実現するための溶接機の開発

Fe-Mn-Si 系合金に特化し、人体に有害な Mn ヒュームを大幅に低減でき、制震ダンパーの断面として想定する H 形鋼の製作を可能とする溶接システムを開発した。また、溶接施工を通じて、明らかになった溶接機に付与すべき必要機能(俵い装置およびワイヤの巻クセ矯正装置)の導入を実施した。溶接ワイヤ矯正機の導入により、安定した溶接アーク状態を実現し、俵い装置の導入により、長手溶接部に対して溶接ひずみによる溶接線の微妙なずれ等を解決することで良好な溶接ビードを実現した。これらの機能を付与した本プロジェクトで開発した溶

接システムについて、Fe-Mn-Si 系合金を使用した実機サイズ H 形鋼ダンパーの製作に対して、十分な実用性を有していることを実施工により確認した。

### 3 - 3 本技術を用いたメンテナンスフリー制震ダンパーの試作と性能検証

#### 3.3.1 メンテナンスフリー制震ダンパーの試作

性能と溶接施工性が両立する制震ダンパー最適形状設計を行い、制震ダンパーを試作した。高マンガン・ヒューム吸引機能を有する溶接システムおよび粗粒用超音波探傷システムを使用したダンパー施工に関して、蓄積した溶接条件および超音波探傷条件により、制震ダンパーの工場生産における有効性を検証した。これらの成果を H 形断面制震ダンパーの製作工程管理表にまとめた。

#### 3.3.2 制震ダンパーの性能検証

本事業で取り組んだ溶接、非破壊検査技術全般に関する開発成果を反映した上記の試作制震ダンパーの性能検証実験を行った。実機サイズ H 形制震ダンパーの動的加力試験により、最大許容変形量  $\pm 2.0\%$ 、最大変形荷重 1000kN 以上の性能を確認した。また、ひずみ振幅  $\pm 1.0\%$  低サイクル疲労試験を実施し、現行の極低降伏点鋼制震ダンパーの 3 倍程度の疲労寿命を確認した。既存技術に対する顕著な性能優位性を発揮したが、Fe-Mn-Si 系合金母材の疲労性能を考慮して設定した目標値であった 5 倍以上の疲労寿命には達しなかった。しかし、地震を想定したランダム波加力実験により、繰り返し地震波を入力しても、性能劣化がほとんどない安定した性能を示すことを確認し、長周期地震動に対してメンテナンスフリーのスペックを有する、という本研究の最も重要な目標は達成できた。

今後は、本来の性能目標値に向けての改良等を進め、Fe-Mn-Si 系合金の溶接・非破壊検査技術成果と併せて本制震ダンパーの実用化と普及に向けて継続的に取り組んでいきたい。

以上