

様式-3③ 研究成果の概要

三次元熱伝導解析と再現熱サイクル試験による 高経年鋼材溶接熱影響部の靱性評価

大阪大学接合科学研究所 助教 崎野 良比呂

概要：

古い鋼橋を補修・補強する場合、熱影響部の靱性低下の懸念から溶接は敬遠されてきた。本研究では、高経年鋼材の補修に溶接を用いるための基礎的研究として、1パスおよび多層溶接時の高経年鋼材の溶接熱影響部の靱性変化を、再現熱サイクル試験によって検討した。高経年鋼材には、1930年代の鋼材3種と、1968年に鋼材1種を用いた。また、多層溶接時の熱履歴の推定には、三次元非定常熱伝導解析を用いた。

その結果、1パス溶接のCGHAZでは、高経年鋼材は溶接入熱によりシャルピー吸収エネルギーがすべて47J以下となった。1968年の高経年鋼材のFGHAZでは吸収エネルギーが大きく上昇すが、1930年代の鋼材では、FGHAZでも吸収エネルギーの上昇は見られなかった。しかし、多層溶接の場合には、1968年の鋼材や1930年代の鋼材でも、最高到達温度後の到達温度が880℃程度となる場合には吸収エネルギーが母材の値より向上する事が明らかとなった。

キーワード：高経年鋼材、熱影響部、シャルピー吸収エネルギー、再現熱サイクル試験、三次元熱伝導解析

1. 結論

現在、橋梁の補修・補強による延命が喫緊の課題となっている。補修・補強には鋼材の接合が必要となるが、これにはボルト接合が多く用いられており、溶接は敬遠されてきた。これは、高経年鋼材では溶接熱影響部の靱性が低下して脆性破断が発生し易くなるのではないかとこの不安がついて回っているためである。

現状では、脆性破断防止のクライテリアとしてシャルピー吸収エネルギーが広く用いられており、低応力脆性破断防止の値や全面降伏後脆性破断防止の値が適用、もしくは提案されている。しかし、一般に母材や溶接金属と異なりHAZは狭い範囲で材料特性が大きく変化している。このため、CTOD試験やシャルピー衝撃試験では、き裂が調べたい部分からそれて進展する等により調べたい部位の値が求められないことが多い。この様に、実際の溶接継手を用いてHAZの局所的な靱性を把握することは難しい。そこで、HAZを再現し靱性を推定する再現熱サイクル試験の適用が考えられる。再現熱サイクル装置は、通電による急速・高温加熱により各種熱加工が再現できる装置であり、溶接時の熱サイクルによる再結晶も一様材として再現できる。一様材であれば材料特性の不

均質性に起因するばらつきを排除でき、調べたい局所的な部位の試験を精度良く行うことができる。

本研究の目的は、昭和40年代以前の鋼橋の補修・補強に溶接を安心して用いるための基礎的研究として、1パスおよび多層溶接時の高経年鋼材の溶接熱影響部の靱性変化を、再現熱サイクル試験により明らかにすることである。本研究の結果は、鋼橋の補修・補強に対して溶接が適用できるか否かを判断するための基礎資料となり、補修・補強方法の選択肢が広がると考える。

2. 使用鋼材の材料試験結果

使用した鋼材は、高経年鋼材4種と比較のため本年度購入した鋼材1種である。

高経年鋼材のOLD-1は1968年に製作され、使用されずに保管されていた鋼材である。OLD-2～4はいずれも1930年代に製作された橋梁を解体した際に譲り受けた鋼材である。現在の鋼材は、SM400を用いた。

鋼材の板厚は、SM400が22mm、OLD-1が12.7mm、OLD-2が10mm、OLD-3が12.7mm、OLD-4が9mmである。

(1) 鋼材の引張試験

各鋼材の引張特性を把握するため引張試験を行った。

表1 引張試験結果と成分分析結果

	Tensile test results				Chemical composition (%)											
	σ_T (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ (%)	YR (%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B	Ceq
					$\times 10^2$			$\times 10^{-3}$		$\times 10^{-2}$			$\times 10^{-3}$			$\times 10^{-2}$
SM400	258	423	-	61	13	19	90	13	3	10	2	4	1	1	0	30
OLD-1	281	455	46	62	20	4	80	14	19	6	2	2	1	2	0	34
OLD-2	282	486	32	58	33	<1	48	26	66	6	3	22	<1	2	0	41
OLD-3	248	419	34	59	23	<1	43	26	40	16	2	18	<1	2	0	31
OLD-4	306	461	37	66	27	2	48	56	107	3	1	<1	<1	3	0	35
JIS-SM400B	>245	400 -510	>23	-	<20	<35	60 -140	<35	<35	-	-	-	-	-	-	-

$$Ceq = C + Si/24 + Mn/6 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

結果を表1に示す。表中には JIS における規格値 (JIS-SM400B) も示している。高経年鋼材の降伏点は 250-300MPa 程度、引張強さは 400-590MPa 程度と強度は 400MPa 級鋼レベルであると言える。伸びも 30%以上あり、降伏比も比較的小さい。

この様に、引張試験結果から見ると、4 種の高経年鋼材は SM400 相当であると言える。

(2) 成分分析

各鋼材の成分を把握するため成分分析を行った。結果を表1に示す。表中には引張試験結果と同じく、JIS における規格値も示している。高経年鋼材の炭素量は、OLD-1 が 0.20% と SM400B の上限と同じ値、OLD-2~4 はいずれも 0.20%以上と JIS の規定を上回っている。Si と Mn は少ないが、P と S が現在の鋼材よりも多い。OLD-1 は、現在の鋼材よりも P と S が多いものの JIS の規格値以下であるが、OLD-2 と OLD-3 は S が、OLD-4 は P と S の両方が規格値を大きく上回っている。また、高経年鋼材は炭素量は多いものの Mn が少ないため、炭素等量(Ceq)は 30-40 とそれほど大きくない。

この様に、成分分析結果から見ると、OLD-1 は C, P, S が SM400B の規格値上限の鋼材、OLD-2~4 は C, P, S の規格値を大きく超えた鋼材であると言える。

(3) シャルピー衝撃試験

各鋼材の熱履歴を受ける前の靱性を推定するため、シャルピー衝撃試験を行った。使用した試験片は、OLD-2 と OLD-3 が幅 7.5mm のサブサイズ、それ以外がフルサイズ 4 号試験片とした。試験片数は 1 温度 4 片とした。試験結果から得られたエネルギーおよび破面遷移曲線を図1~5に示す。

現在の鋼材である SM400 は、0℃での吸収エネルギーが平均で 185J となっており、規格値や提案値に比べて高いが、これまでに再現熱サイクル試験で行ってきた 400MPa 級鋼と同等程度の値である。また、破面遷移温度は-10℃程度となっている。

これに対し高経年鋼材は、OLD-1 が、0℃での吸収エネルギーが平均で 75J となっており、全面降伏後脆性破断防止の提案値 70J を若干上回っている。また、破面遷移温度は 10℃程度となっている。よって、OLD-1 は現在の鋼材よりも靱性は低いものの、脆性破断に対する基準値や提案値はクリアしている鋼材であると言える。

しかし、OLD-2, 3, 4 は 0℃での吸収エネルギーの平均がそれぞれ 25, 23, 37J と低応力脆性破断防止のための規格値 27J や 47J を下回っている。破面遷移温度も 20℃以上であり、非常に靱性の低い鋼材であると推定される。

3. 実験概要

これら鋼材から、SM400, OLD-1, OLD-3 は 11×11×60mm の、OLD-2 は 10×11×60mm の、OLD-4 は 9×11×60mm の再現熱サイクル試験片を切り出し、再現熱サイクル装置 (Gleeble 1500) を用いて熱履歴を与えた。温度のコントロールは試験片中央に取り付けた熱電対で行い、雰囲気ガスはヘリウムを用いた。再現熱サイクル試験の後、OLD-2 と OLD-4 を幅 7.5mm のサブサイズ、それ以外をフルサイズ 4 号試験片に加工してシャルピー衝撃試験に供した。試験温度は 0℃、試験片数は各条件で 4 片ずつとした。なお、サブサイズ試験片の吸収エネルギーはフルサイズに換算して表記している。

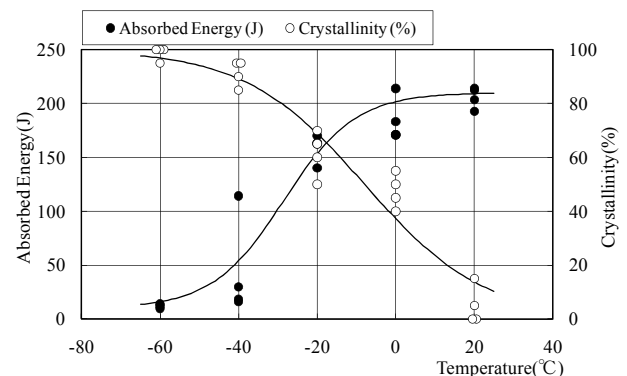


図1 シャルピー遷移曲線 (SM400)

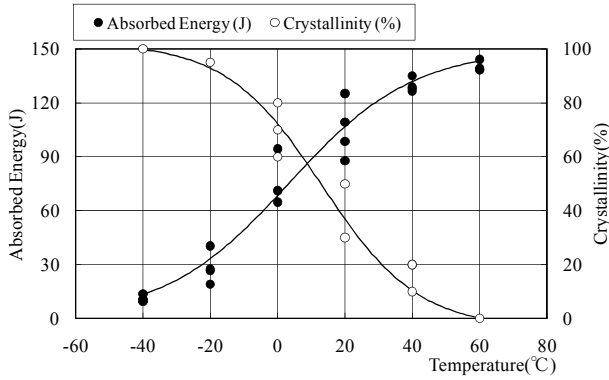


図2 シャルピー遷移曲線 (OLD-1)

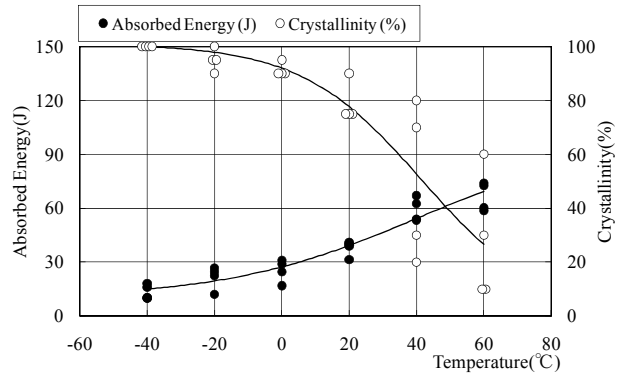


図3 シャルピー遷移曲線 (OLD-2)

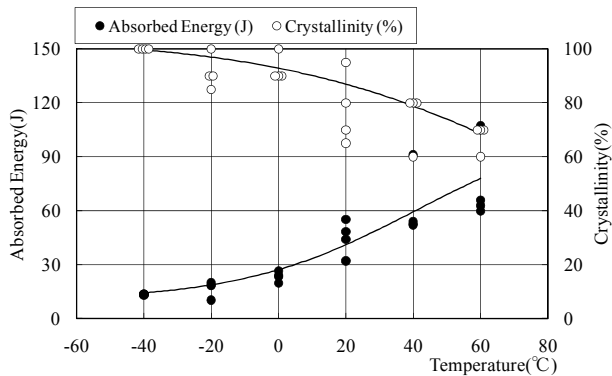


図4 シャルピー遷移曲線 (OLD-3)

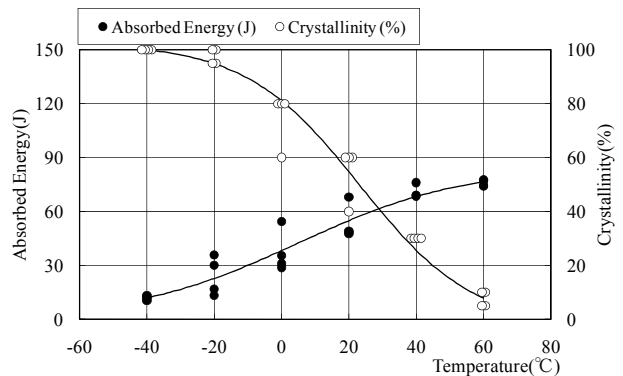


図5 シャルピー遷移曲線 (OLD-4)

4. 再現溶接熱サイクルと実験結果

(1) 溶接入熱量の影響

溶接時の様々な条件により HAZ の組織および材料特性は大きく異なる。しかし、1 パス溶接で最高到達温度が同じ場合、溶接時の諸条件下での 800°C から 500°C までの冷却時間 ($t_{8/5}$) によって、溶接部の組織および材料特性がほぼ決定されることが報告されている。また、溶接入熱量と $t_{8/5}$ との関係の実験式が提案されている^{1), 2)}。

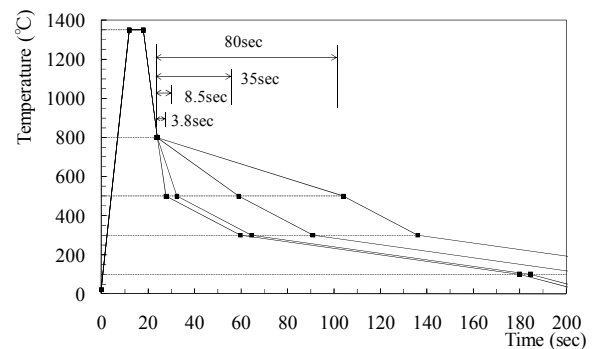
そこで、実験ではこの 800°C から 500°C までの冷却時間により溶接時の溶接入熱量を一義的に代表させた。以下本研究では、溶接部の板厚が 20mm、板の初期温度が 20°C の溶接部において、土木建築分野で最も多く使われている CO₂ ガスシールドアーク溶接を用いた場合の換算入熱量 (以下 CO₂ 換算入熱量と称す) を用いて議論を進めていくこととする。実験に用いた $t_{8/5}$ =0, 3.8, 8.5, 35, 80sec は、CO₂ 換算入熱量で 0, 10, 16, 37, 60kJ/cm に相当する。最高到達温度は、CGHAZ の最高到達温度域 (Melting point~1200°C) である 1350°C を用いた。熱サイクルを図 6 に示す。

CO₂ 換算入熱量とシャルピー吸収エネルギーの関係を図 7~9 に示す。図中には試験片それぞれのシャルピー吸収エネルギーの値 (■) とその平均値 (■) および回帰曲線を示している。また、建築構造用鋼材に対してして定

められているシャルピー吸収エネルギーの規格値 27J、溶接構造用圧延鋼材 SM-C 材や一部の溶接金属に定められている規格値 47J、文献 3) において全面降伏後脆性破壊防止の値として母材及び熱影響部に対して提案されている値 70J も図中にそれぞれ鎖線、点線、実線で記している。なお、OLD-2~4 については実験結果がほぼ同じであったため、紙面の関係で 1 種類のみを示している。

現在の鋼材である SM400 は、CO₂ 換算入熱量 10kJ/cm と 16kJ/cm で吸収エネルギーは 47J 程度に低下した。しかし、そのまま単調に低下するのではなく、37 kJ/cm で平均で 100J 程度まで回復する傾向が見られた。しかし、60 kJ/cm 以上では 47J 以下に低下した。

1968 年の鋼材である OLD-1 も、CO₂ 換算入熱量 10kJ/cm と 16kJ/cm で吸収エネルギーは 27J 程度に低下した。ま


 図6 再現溶接熱サイクル
(溶接入熱量の影響)

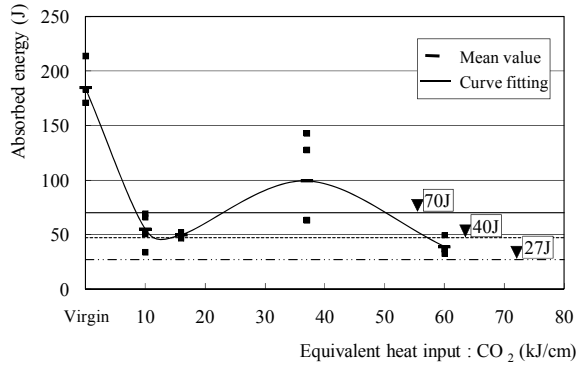


図7 溶接入熱量の影響 (SM400)

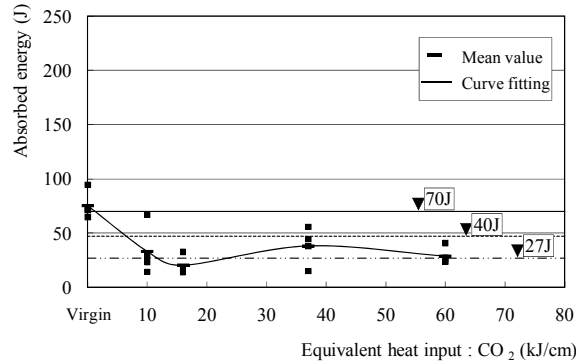


図8 溶接入熱量の影響 (OLD-1)

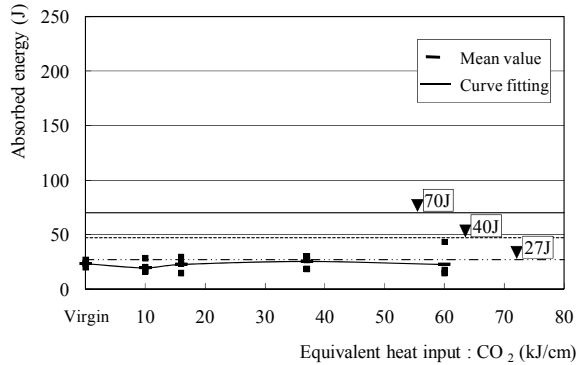


図9 溶接入熱量の影響 (OLD-3)

た、SM400と同様、37 kJ/cmにおいて吸収エネルギーが回復する傾向が見られたが、その値は平均で47J以下と大きくなかった。60 kJ/cm以上では27J程度に低下した。

1930年代の鋼材であるOLD-2~4は、溶接入熱により27J程度に低下し、CO₂換算入熱量が大きくなってもその値は27Jを超えることがなかった。

この様に、高経年鋼材は、溶接入熱により吸収エネルギーがすべて47J以下となり、溶接入熱量によって吸収エネルギーが回復する現象もほとんど見られなかった。

(2) 最高到達温度の影響

HAZ内でもボンド部からの距離により最高到達温度が異なるため材料特性は大きく異なる。そこで、最高到達温度が低靱性鋼のシャルピー吸収エネルギーに及ぼす影響を調べるため、 $t_{8/5}$ を8.5secで一定とし、最高到達温度を変化させた熱サイクルを用いた実験を行った。最高到達温度は、1350℃、1000℃、800℃とした。最高到達温

度1000℃は細粒熱影響部(Fine grained HAZ : FGHAZ)の最高到達温度域(1200~850℃)に、最高到達温度800℃は粒状熱影響部(Intercritical HAZ : ICHAZ)の最高到達温度域(850~750℃)にあたる。

最高到達温度とシャルピー吸収エネルギーの関係を図10~12に示す。図中には、規格値等の他に母材の値(Virgin)も二点鎖線で示している。

SM400は、FGHAZにあたる1000℃でのシャルピー吸収エネルギーが70Jを大きく超え、300J程度と母材の場合の1.5倍以上に上昇している。ICHAZにあたる最高到達温度800℃でのシャルピー吸収エネルギーでも平均で130J程度であり、規格値や提案値を大きく上回っている。

OLD-1も、1000℃でのシャルピー吸収エネルギーが180J程度と母材の場合の1.5倍以上に上昇している。最高到達温度800℃でのシャルピー吸収エネルギーでも平均で75J程度であり、規格値や提案値を上回っている。

しかし、OLD-2は、最高到達温度が1000℃および800℃

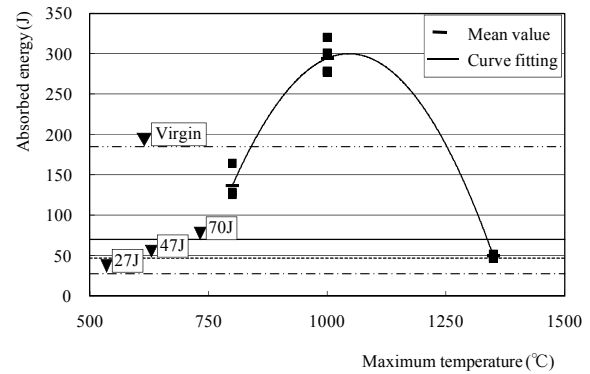


図10 最高到達温度の影響 (SM400)

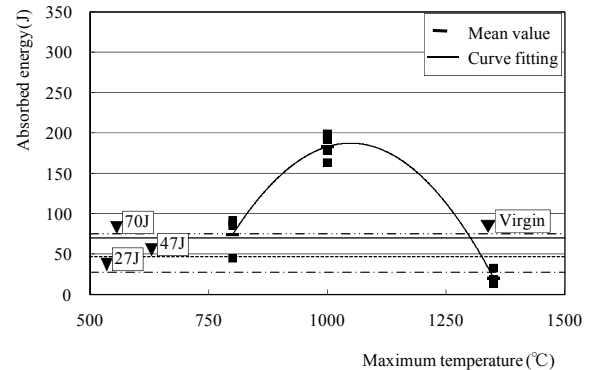


図11 最高到達温度の影響 (OLD-1)

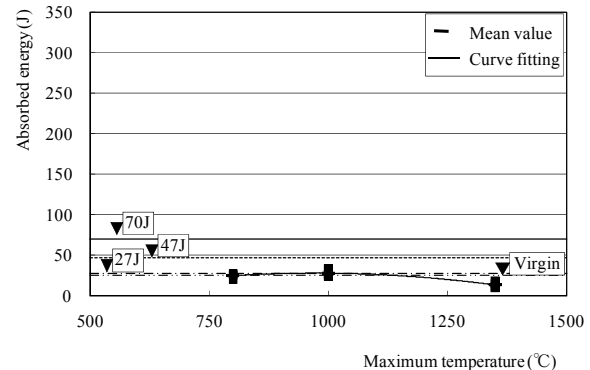


図12 最高到達温度の影響 (OLD-2)

でも吸収エネルギーは27J程度と低いままである。OLD-3が最高到達温度1000℃で、OLD-4が最高到達温度800℃で70J付近まで上昇しているが、現在の鋼材やOLD-1のような大きな上昇は見られなかった。

この様に、1968年の高経年鋼材は、現在の鋼材と同様、FGHAZに当たる最高到達温度で吸収エネルギーが大きく上昇したが、1930年代の高経年鋼材では大きな吸収エネルギーの上昇は見られず、70J程度以下のままであった。

(3) 多層溶接の影響

多層溶接時のボンド部の溶接熱サイクルを推定することを目的として、幅260mm板厚12mmの板の突合せ溶接部に三次元非定常熱伝導解析を適用した。熱源の移動は考慮している。溶接は3層3パス溶接とし、各パス共に電流370A、電圧30V、溶接速度20cm/minとした。熱効率は狭隘部の溶接であることから0.8を用いている。このモデルの、各パスで生成される溶接金属に隣接する熱影響部に当たる要素の熱履歴解析結果を対象とし、図12に示す熱履歴にモデル化して再現熱サイクル試験を行った。

熱影響部の位置とシャルピー吸収エネルギーの関係を図14～16に示す。初層、2層、3層の溶接金属に隣接する熱影響部をそれぞれ、First layer, Middle layer, Last layerと称している。

SM400は、First layer, Middle layerのシャルピー吸収エネルギーが200Jを超え、母材の値よりも大きな値を示している。Last layerでは母材の値よりも低下しているものの70J以上であり、いずれも1パス溶接時のCGHAZ部の吸収エネルギーよりも大きく向上している。

OLD-1も、First layer, Middle layerのシャルピー吸収エネルギーが、母材の値よりも大きな値を示している。Last layerでは母材の値よりも低下し、70J以下となっているものの、1パス溶接時のCGHAZ部の吸収エネルギーよりも向上している。

しかし、OLD-2とOLD-4は、いずれの熱履歴でも吸収エネルギーの変化はなく、母材および、1パス溶接時と同様に吸収エネルギーは低いままであった。ただし、OLD-3のFirst layerでは吸収エネルギーが上昇し、70J程度となっていた。

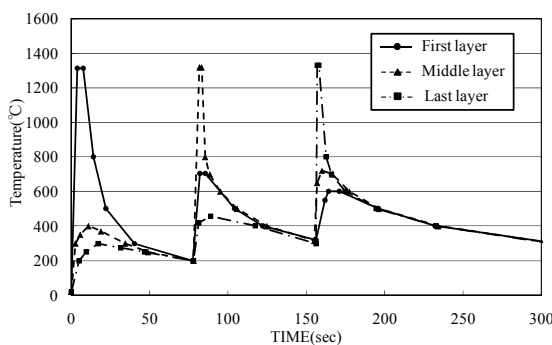


図13 熱履歴 (多パス溶接の影響)

この様に、1968年の高経年鋼材は、現在の鋼材と同様、多パス溶接では1パス溶接より吸収エネルギーが向上し、特に1層目と2層目の溶接金属に隣接する熱影響部で吸収エネルギーが母材以上に大きく上昇した。しかし、1930年代の高経年鋼材ではほとんどの熱履歴で大きな吸収エネルギーの上昇は見られなかった。

(4) 最終パスの到達温度の影響

多層溶接時の OLD-3 では、最終パスが 700℃となる First layer の場合に吸収エネルギーの向上が見られた。低韌性材を用いた既往の研究においても最高到達温度後の到達温度が吸収エネルギーに大きな影響を及ぼすことが示されている。そこで、図17に示す熱履歴を用いて再現熱サイクル試験を行った。

最終パスの到達温度とシャルピー吸収エネルギーの関係を図18～20に示す。

SM400は、最終パスが1350℃の場合には、1パス溶接

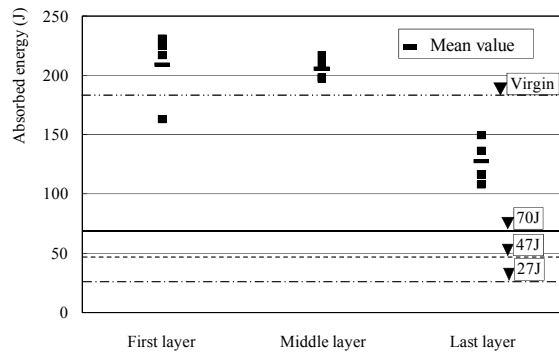


図14 多層溶接の影響 (SM400)

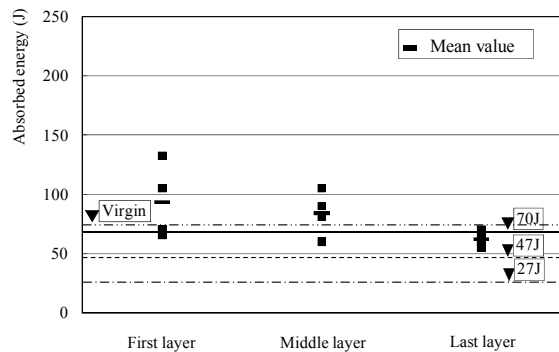


図15 多層溶接の影響 (OLD-1)

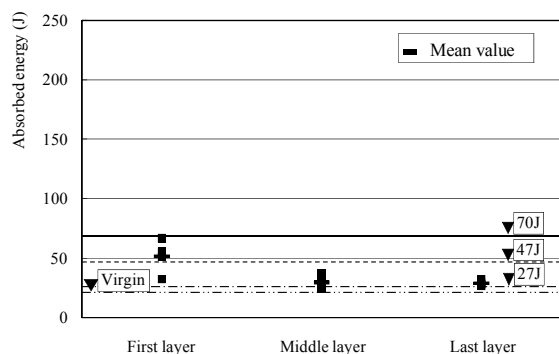


図16 多層溶接の影響 (OLD-3)

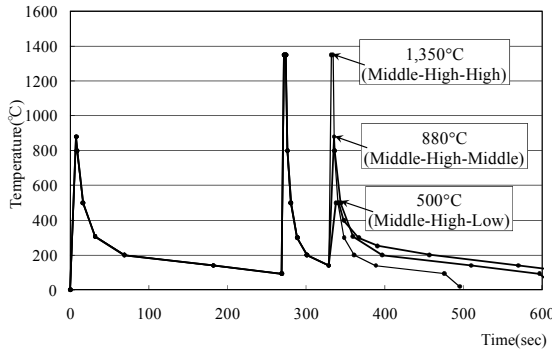


図 17 熱履歴（最高到達温度後の到達温度の影響）

の場合のシャルピー吸収エネルギーとあまり変わっていない。しかし、最終パスが 880℃と 500℃の場合に、70J 以上に向上している。

OLD-1 も、最終パスが 880℃の場合に吸収エネルギーが約 150J と母材の値よりも大きな値を示している。最終パスが 1350℃と 500℃の場合には 47J 以下であり、大きな吸収エネルギーの向上は見られなかった。

OLD-2～4 でも、最終パスが 880℃の場合にはいずれの鋼材でも、吸収エネルギーが母材の値よりも大きな値を示し、70J 以上となっている。最終パスが 1350℃と 500℃の場合には 1 パス溶接と同様に吸収エネルギーは低いままであった。

この様に、1968 年の高経年鋼材や 1930 年代の高経年鋼材でも、最高到達温度後の到達温度が 880℃の場合にはシャルピー吸収エネルギーが母材の値より向上し、70J 以上となった。

6. 結論

本研究で用いた鋼材および熱サイクルにおいて得られた知見は以下の通りである。

- (1) 高経年鋼材は、1 パスの溶接入熱により CGHAZ のシャルピー吸収エネルギーがすべて 47J 以下となる。また、現在の鋼材のように、溶接入熱量によってシャルピー吸収エネルギーが回復する現象もほとんど見られない。
- (2) 1 パス溶接の場合でも、1968 年の高経年鋼材は現在の鋼材と同様、FGHAZ に当たる最高到達温度で吸収エネルギーが大きく上昇する。しかし、1930 年代の高経年鋼材では、最高到達温度の違いによる大きなシャルピー吸収エネルギーの上昇は見られない。
- (3) 1968 年の高経年鋼材や 1930 年代の高経年鋼材でも、最高到達温度後の到達温度が 880℃となる多層溶接の場合にはシャルピー吸収エネルギーが母材の値より向上し、70J 以上となる。

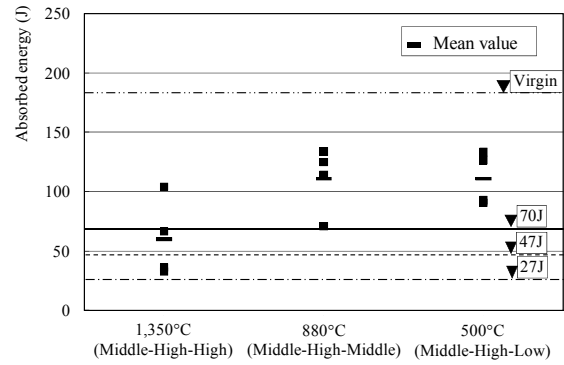


図 18 最終パスの到達温度の影響（SM400）

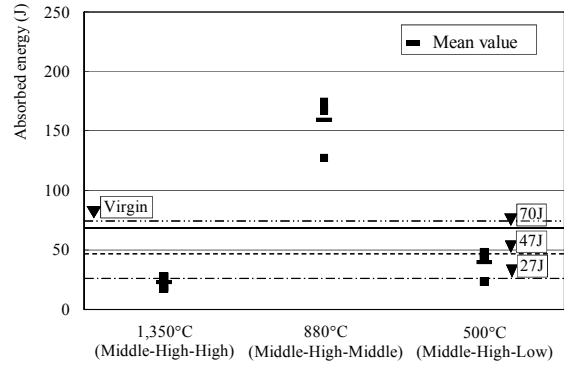


図 19 最終パスの到達温度の影響（OLD-1）

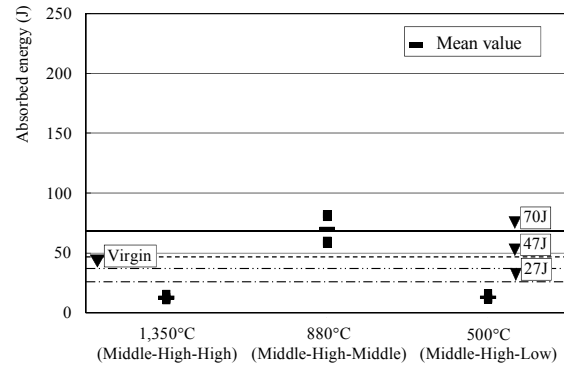


図 20 最終パスの到達温度の影響（OLD-4）

謝辞：本研究を進めるにあたり、大阪大学・堀之内努技術専門職員と大阪大学大学院・玉川新悟君の協力を得た。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 稲垣 道夫, 中山 治方, 岡田 明: 被覆アーク溶接ならびにサブマージアーク溶接における冷却過程について一構造用鋼のアーク溶接時における溶接部の冷却過程に関する研究(第 1 報) 一, 溶接学会誌, Vol. 34, No. 10, pp. 28-39. 1965.
- 2) 日本溶接協会: 鋼構造溶接工作法通論, p. 226.
- 3) 日本建築センター: 鉄骨梁端溶接接合部の脆性的破壊防止ガイドライン・同解説, pp. 5-9.
- 4) 崎野良比呂, 金裕哲: 低韌性鋼熱影響部のシャルピー吸収エネルギーに及ぼす溶接条件の影響, 鋼構造論文集, Vol. 17, No. 67, pp. 43-52, 2010.