

高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能

(その7 試験概要と溶接金属の化学成分)

正会員 ○竹内秀紀*1 正会員 加賀美安男*2 正会員 藤田哲也*3
 同 後藤和正*4 同 廣重圭一*5 同 鈴木励一*6

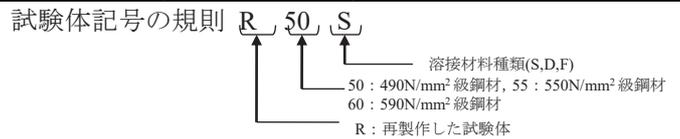
高張力鋼 溶接材料 溶接条件
 立向溶接 化学成分 フラックス入りワイヤ

1. はじめに

著者らは一昨年の研究^{1)~3)}で、550N/mm²級及び590N/mm²級の鋼材に適用するフラックス入りワイヤの立向姿勢で全パス同一入熱における溶接金属の引張強さを求め、溶接材料規格毎の溶接管理条件を設定した。さらに昨年の研究^{4)~6)}では、実際の立向溶接施工では、電流・電圧を一定とし開先幅の拡大に応じてウィービング幅を調整することから、実施工の積層による入熱での溶接金属の機械的性能を求めた。ただ、昨年の研究では溶接金属の窒素含有量が多く靱性が低かったため、本研究では窒素含有量を0.01%以下に制御して実験を行い、溶接金属の機械的性質を調査することを目的とする。

表1 試験体記号と使用材料

試験体記号	鋼種 N/mm ²	溶接材料 (1.2φ) JIS規格名
50S、R50S	490 (SN490B)	T49J0T1-ICA-UH5
50D、R50D		T49J0T1-ICA-U
55S、R55S	550 (TMCP385)	T550T1-ICA-G-UH5
55D		T550T1-ICA-U
55F、R55F		T550T1-ICA-U
60S	590 (SA440A)	T59J1T1-ICA-N2M1-UH5
60D、R60D		T59J1T1-ICA-N3M1-U



2. 試験条件

溶接はCO₂ガスシールドアーク溶接で、初層からの1~4パスは技能者により、5パス以降はウィービング機能を有した簡易自動溶接機で行った。溶接条件は、電流と電圧、すなわち電力を一定とし、パス毎に溶接速度を調整して1層1パスで行った。この結果として各層で入熱量が変化する。表1に試験体記号と使用材料、表2に計画した各パスの溶接条件を示す。

表2 計画した各パスの溶接条件

パス	溶接者	電流 (A)	電圧 (V)	パス間温度 (°C)
1	技能者	180	24 30	室温
2				70~90
3				90~110
4				110~130
5	簡易自動機	180	26 30	130~150
6				150~170
7				170~190
8				190~210
9				210~230
10				230~250

3. 試験方法

試験体は、板厚40mmの裏当て金付きレ形開先(ルートギャップ7mm)の完全溶込み溶接の突合せ継手とした。試験体形状・寸法を図1に示す。試験に用いた鋼材の化学成分分析結果を表3に示す。ガス流量25ℓ/min、ワイヤの突出し長さは15mmとした。

試験体の溶接金属の性能を確認するため、以下の試験を行った。

- 溶接金属の化学成分分析 (C, Si, Mn, Mo, N, Ti, Ni)
- DEPO引張試験 (JIS Z 3111 A0号)
- シャルピー衝撃試験 (JIS Z 3111 Vノッチ試験片)
- マクロ試験

なお、マクロ試験以外は、表層側と下層側から試験片を採取し、入熱量の異なる条件で試験を行なえるようにした。

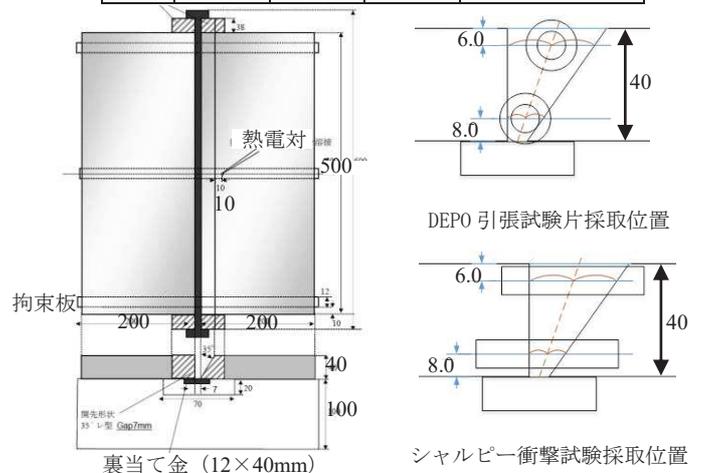


図1 試験体形状・寸法と試験片採取位置

表3 鋼材の化学成分分析結果「単位%(質量分率)」

成分		C	Si	Mn	Mo	V	Cu	Ni
490N	SN490B	0.15	0.26	1.42	-	-	-	-
550N	TMCP385	0.14	0.34	1.37	0.002	-	0.02	0.11
590N	SA440B	0.08	0.24	1.42	0.26	0.04	-	0.12

表4 試験体溶接記録

試験体記号	パス数	パス間温度MAX(°C)	入熱(kJ/cm)		
			1-4パス	5-7パス	8-10パス
50S	10	240	35-43	39-55	73-78
R50S	10	246	32-48	38-55	63-66
50D	9	228	33-40	43-63	80-95
R50D	9	224	42-56	43-60	76-86
55S	10	238	35-49	41-62	70-89
R55S	9	219	43-48	41-63	78-86
55D	9	219	29-40	41-59	70-78
55F	9	216	29-32	45-57	78-84
R55F	9	221	43-48	44-62	71-80
60S	10	250	29-35	38-53	66-76
60D	10	249	23-34	41-57	67-80
R60D	10	242	37-42	37-54	62-75

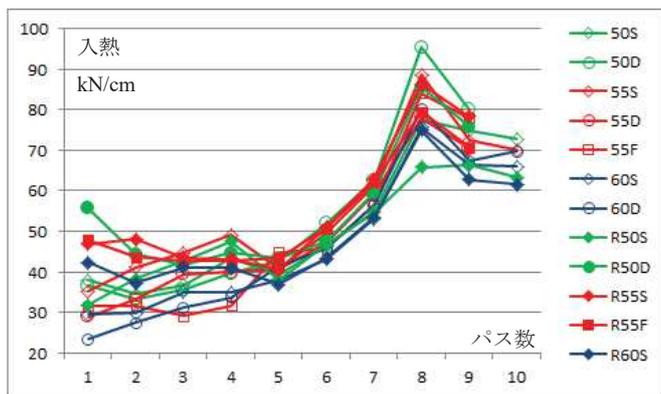


図2 各試験体のパス毎の入熱

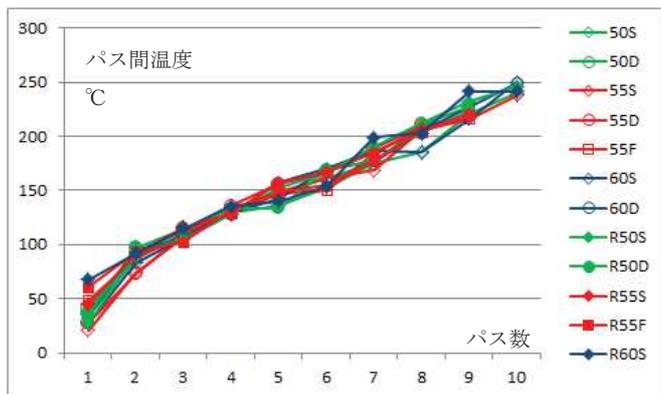


図3 各試験体のパス毎のパス間温度

4. 溶接記録

試験体溶接記録を表4に示す。溶接は、おおむね設定した電流・電圧・パス間温度で行うことができた。

表5 溶接部の化学成分分析結果「単位%(質量分率)」

符号		C	Si	Mn	Mo	Ti	N	Ni
50S	S	0.066	0.47	1.25	—	0.040	0.010	—
	B	0.064	0.52	1.35	—	0.051	0.015	—
50D	S	0.064	0.46	1.21	—	0.035	0.0065	—
	B	0.061	0.55	1.37	—	0.041	0.016	—
55S	S	0.057	0.31	0.96	0.14	0.032	0.0064	—
	B	0.057	0.44	1.20	0.15	0.041	0.013	—
55D	S	0.048	0.42	1.33	0.011	0.051	0.0079	—
	B	0.050	0.45	1.38	0.013	0.066	0.0062	—
55F	S	0.048	0.42	1.31	0.012	0.049	0.011	—
	B	0.050	0.46	1.40	0.010	0.069	0.015	—
60S	S	0.052	0.46	1.35	0.006	0.037	0.012	0.53
	B	0.062	0.54	1.50	0.007	0.040	0.011	0.51
60D	S	0.046	0.35	1.28	0.017	0.030	0.0060	1.59
	B	0.048	0.45	1.56	0.018	0.045	0.0059	1.53
R50S	S	0.067	0.54	1.33	—	0.045	0.0066	—
	B	0.067	0.50	1.35	—	0.044	0.0093	—
R50D	S	0.053	0.43	1.16	—	0.036	0.0088	—
	B	0.073	0.42	1.15	—	0.035	0.0074	—
R55S	S	0.061	0.31	0.98	0.14	0.026	0.0056	—
	B	0.060	0.38	1.10	0.14	0.039	0.0078	—
R55F	S	0.054	0.36	1.23	0.012	0.042	0.0037	—
	B	0.055	0.37	1.22	0.012	0.056	0.0065	—
R60S	S	0.056	0.43	1.35	0.009	0.037	0.0049	0.49
	B	0.060	0.47	1.40	0.010	0.036	0.0056	0.48

S：表層側からの採取試験片、B：下層側からの採取試験片

図2に示す通り、各試験体ともに1~5パス目までは入熱が40kJ/cmであったのが、それ以降は入熱が徐々に高くなり、8パス目が80kJ/cm前後のピークに達していた。

図3にはパス毎のパス間温度を示す。ただし、最終パスは溶接直後の温度を示す。

板厚40mmの全試験体において、最大入熱が80kJ/cm前後でもパス間温度は250°C以内で納まっている。

5. 溶接部の化学成分分析結果

溶接部の化学成分分析結果を表5に示す。550N級と590N級の溶接ワイヤにMoが添加され、特に55Sは0.15%と多く添加されていることがわかる。590N級では量は異なるもののNiが添加されている。なお、Nが0.01%以上となった試験体については、0.01%未満になる試験体を再製作した。(Rシリーズ)

6. まとめ

本稿では、溶接方針、試験体形状、溶接条件、試験項目、試験体溶接記録、溶接部の化学成分分析結果について報告した。機械試験結果及び試験結果の分析はその8、その9で報告する。

参考文献:

- 1) 松浦ら;高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能その1
- 2) 藤田ら;高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能その2
- 3) 加賀美ら;高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能その3
上記全て日本建築学会大会学術講演梗概集2014年
- 4) 竹内ら;高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能その4
- 5) 藤田ら;高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能その5
- 6) 加賀美ら;高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能その6
上記全て日本建築学会大会学術講演梗概集2015年

*1 安井建築設計事務所,*2 日建設計,*3 日本設計,
*4 大成建設,*5 類設計室,*6 神戸製鋼所

*1 Yasui Architects,INC. *2 Nikken Sekkei Ltd. *3 Nihon Sekkei Inc.
*4 Taisei Corporation *5 Rui.Sekkeisitsu.Co.Ltd *6 Kobe Steel,Ltd.

高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接条件と性能

(その8 溶接金属の機械的性質)

正会員 ○藤田哲也*1 正会員 加賀美安男*2 正会員 竹内秀紀*3
 同 後藤和正*4 同 廣重圭一*5 同 鈴木励一*6

高張力鋼 引張試験 シャルピー衝撃試験
 立向溶接 フラックス入りワイヤ

1. はじめに

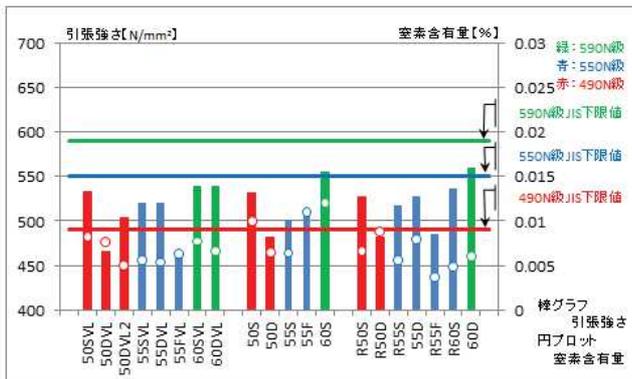
前報(その7)では、高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接試験の試験概要と溶接記録、試験片採取位置と形状寸法を報告した。本報では、これらの機械試験結果を報告する。

2. DEPO 引張試験結果

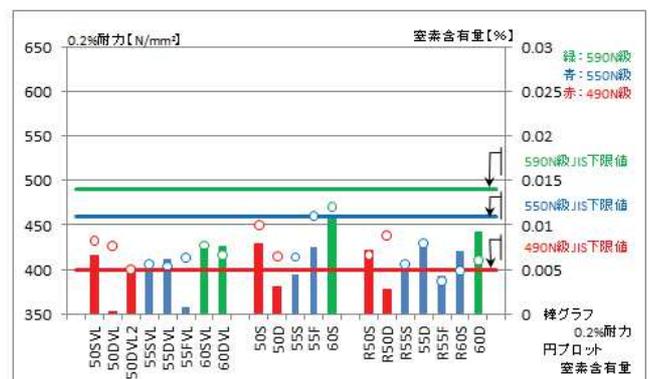
DEPO 引張試験は室温(約20°C)で、JIS Z 2241 による試験方法で実施し、その結果を表1に一覧表で示す。

図1及び図2に引張試験結果である試験体毎の引張強さ及び0.2%耐力を示す。なお、これらの図には本年実験の溶接条件と同様の昨年実験の溶接条件 P_L シリーズの試験体についてもプロットして比較する。また、窒素含有量についてもプロットする。

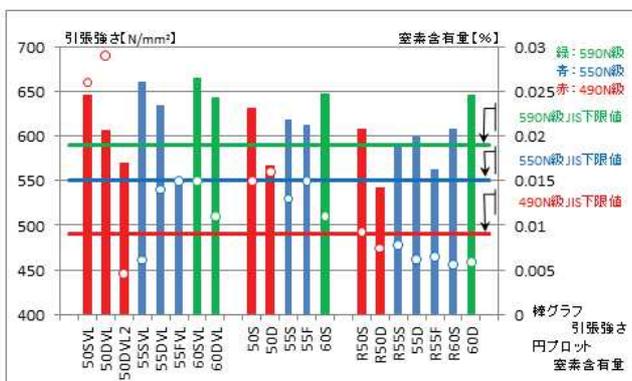
これらの図から、①低入熱の初層側より高入熱の表層側の方が強度は低かった。②初層側ではいずれも溶接ワイヤ強度クラスに見合った JIS 下限値を引張強さ及び0.2%耐力共に満足した。③表層側では溶接ワイヤ強度クラスに見合った JIS 下限値を引張強さ及び0.2%耐力共にほとんど満足しなかった。④表層側の強度を JIS 下限値以上とするには、490N 級では550N 級以上対応の、550N 級では590N 級対応のワイヤ銘柄を厳選する必要がある、590N 級に好適なワイヤはなかった。⑤溶接材料種類の S シリーズは強度クラスによらず強度差がほとんどないのに対し、D シリーズは強度クラスに応じた強度上昇が顕著であった。⑥溶接金属中に窒素含有量が上昇すると強度は上昇する傾向にあった。



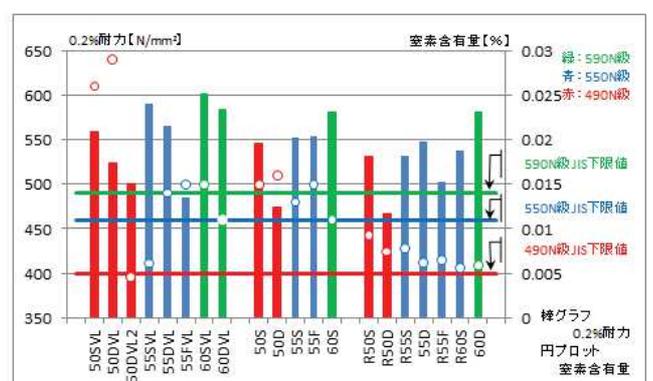
(a) 表層側



(a) 表層側



(b) 初層側



(b) 初層側

図1 引張試験結果 (引張強さと窒素含有量)

図2 引張試験結果 (0.2%耐力と窒素含有量)

表 1 DEPO 引張・衝撃試験結果

符号		引張試験				衝撃試験(0°C)	
		0.2% 耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	破断伸び [%]	絞り [%]	シャルピー衝撃値 [J]	脆性破面率 [%]
50S	S	429	531	28	69	88	53
	B	545	631	22	57	45	47
50D	S	380	481	31	74	102	45
	B	474	566	25	71	65	48
55S	S	394	501	30	76	172	33
	B	552	618	27	73	26	65
55D	S	430	528	25	74	44	55
	B	548	600	24	67	68	50
55F	S	425	513	29	73	52	60
	B	554	613	21	67	32	60
60S	S	457	555	28	70	98	42
	B	580	647	20	61	60	37
60D	S	442	559	28	70	149	20
	B	580	646	21	69	133	5
R50S	S	421	527	29	71	89	45
	B	531	607	21	58	44	48
R50D	S	378	482	33	74	44	55
	B	467	541	28	70	29	57
R55S	S	407	517	31	75	107	47
	B	532	590	23	72	34	65
R55F	S	393	485	31	75	169	32
	B	502	562	22	72	64	45
R60S	S	420	536	30	72	124	15
	B	538	608	23	66	82	18

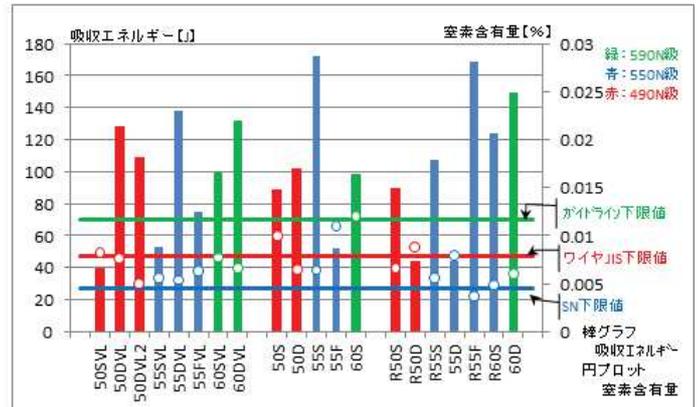
S : 表層側からの採取試験片、B : 初層側からの採取試験片

3. シャルピー衝撃試験結果

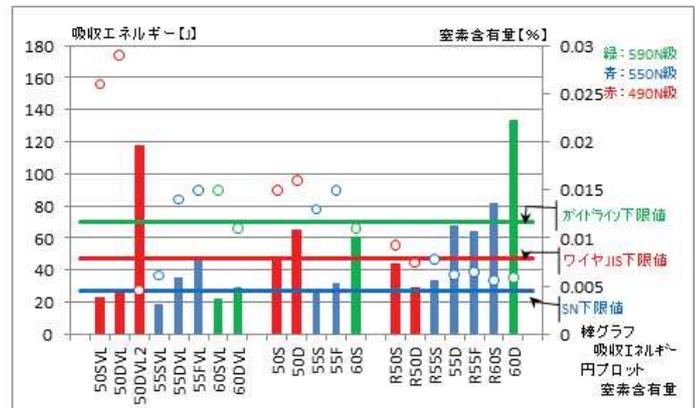
シャルピー衝撃試験は試験片温度を 0°C に安定させて、JIS Z 2242 による試験方法で実施した。その結果を表 1 に一覧表で示す。

ワイヤのシャルピー衝撃試験の規格値は、全試験体で吸収エネルギーが 47J 以上 (50、55 シリーズは試験温度 0°C、60 シリーズは試験温度 -5°C) である。

図 3 に衝撃試験結果である試験体毎の吸収エネルギーとその試験片採取位置の窒素含有量を示す。なお、これらの図には本年実験の溶接条件と同様の昨年実験の溶接条件 P_L シリーズの試験体についてもプロットして比較する。また、60 シリーズは -5°C の規格値であり試験温度 0°C の吸収エネルギーが規格値を超えてないと満足しないことになるが、ここでは参考規格値とする。



(a) 表層側



(b) 初層側

※60 シリーズの JIS 下限値は試験温度 -5°C での値のため参考値

図 3 衝撃試験結果 (吸収エネルギーと窒素含有量)

図 3 から、①低入熱の初層側より高入熱の表層側の方が吸収エネルギーは高く、一般的見解とは異なる結果となった。②初層側においては、梁端脆性破壊防止ガイドラインで求められる 70J を得ようとすれば 590N 級対応のワイヤが必要となる。これは Ni が添加されているためであると考えられる。③溶接金属中に窒素含有量が増加すると吸収エネルギーは減少する傾向にある。特に窒素含有量が 0.01% 以上であると、吸収エネルギー 70J の確保が一部で難しい傾向であった。

4. まとめ

本稿では、溶接部の機械試験として、DEPO 引張試験及びシャルピー衝撃試験の結果を報告した。引張特性において、入熱の高い表層側では強度に応じた溶接ワイヤを使用しても、必要強度が得られなかった。衝撃特性において、入熱の低い初層側の方が吸収エネルギーは低くなった。この原因については本稿では言及できておらず、更なる検討が必要である。

*1 日本設計,*2 日建設計,*3, 安井建築設計事務所
*4 大成建設,*5 類設計室,*6 神戸製鋼所

*1 Nihon Sekkei Inc.*2 Nikken Sekkei Ltd. *3 Yasui Architects,INC.
*4 Taisei Corporation *5 Rui.Sekkeisitsu.Co.Ltd,*6 Kobe Steel,Ltd.

高張力鋼用フラックス入りワイヤを用いた立向溶接における溶接部性能と溶接管理条件

(その9 試験結果の分析および溶接管理条件)

正会員 ○加賀美安男*1 正会員 藤田哲也*2 正会員 後藤和正*3
同 廣重圭一*4 同 竹内秀紀*5 同 鈴木励一*6

立向溶接 溶接条件 フラックス入りワイヤ
硬さ 冷却時間 入熱・パス間温度

1. はじめに

本報では、前報(その7および8)で報告した試験結果の中から、溶接金属中 N 量が 100ppm 以下の試験体を対象とし、引張強さおよびシャルピー吸収エネルギーと溶接条件(入熱・パス間温度)について考察し、立向溶接における鋼材強度毎に適用するフラックス入りワイヤの溶接管理条件を提案する。

2. 冷却時間と硬さ

フラックス入りワイヤの立向溶接の溶接管理条件を設定するために、多層盛り溶接の溶接金属の機械的性質を確認して、適用鋼材の規格下限値を満足する溶接条件を考察したが、溶接金属から部分的に採取した試験片では、連続的に変化する溶接条件の限界を求めることができなかつた。試験片を採取して確認した部分の性能により溶接条件を設定することとなり、偏った条件設定となっていると考えられる。

本試験の立向溶接では、初層から最終層までほぼ一定に上昇するが最高パス間温度は 250℃以下であった。

これらを踏まえて、以下の手順により溶接金属の引張強さが適用鋼材の引張強さ規格下限値を満足する入熱の上限値を求める。以下、硬さと冷却時間、硬さと引張強さの関係式は、前報(その4~6)の試験データを用いた。

①入熱(HI)とパス間温度(θ)がパラメーターとなる 800℃~500℃の冷却時間(CT)の実験式(稲垣¹⁾(1式)を用いた。1式により求めた冷却時間(55Sの例)を表1に示した。試験体毎の各パスの冷却時間を図1に示した。

$$CT = \frac{HI^{1.7}}{2.9 \times (600 - \theta)^2 \times \left(1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{h-13}{3.5}\right)} \quad (1式)$$

ここで、h:板厚

②立向溶接の多層盛り溶接において連続的に変化する溶接条件による各パスの引張強さを求めるために、マクロ試験片を用いて溶接部全断面にて硬さ試験を行った。各強度レベルの代表として、冷却時間の長い側(表層側)で低強度を示した試験体のマクロ試験における硬さおよび DEPO 引張試験の結果を図2に示した。

③各パスの硬さ(パス内の硬さの平均値)と各パスの冷却時間との関係を図3に示した。この相関関係を溶接材料の強度クラス別に 2.1~2.3 式に示した。

$$490N \text{ 級}: Hv = 465.3 \times CT^{-0.185} \quad (2.1式)$$

$$550N \text{ 級}: Hv = 360.1 \times CT^{-0.136} \quad (2.2式)$$

$$590N \text{ 級}: Hv = 359.9 \times CT^{-0.130} \quad (2.3式)$$

④溶接金属の硬さと引張強さの関係は、490N級、550N級および590N級の試験体から採取した DEPO 引張試験片の採取位置に該当する部分の硬さの平均値と DEPO 引張試験により得られた引張強さにより求めた。DEPO 引張試験より得られた引張強さと溶接金属の硬さの関係を図4に示した。この相関関係は溶接材料の強度クラスに関係なく3式に示した。

$$Ts = 2.57Hv + 48 \quad (3式)$$

表1 溶接記録と冷却時間(55Sの例)

パス	電流 A	電圧 V	速度 cm/min	入熱 HI kJ/sec	パス間温度℃	冷却時間 CT sec
1	180	22.6	10.0	24.5	20	15.4
2	177	22.5	8.5	28.0	74	23.6
3	176	22.6	7.6	31.2	106	32.2
4	177	22.6	7.6	31.5	127	35.6
5	168	21.8	7.2	30.4	130	34.1
6	176	22.6	6.9	34.6	146	45.4
7	177	22.6	7.1	33.9	165	47.8
8	174	22.6	3.9	60.0	177	133.3
9	175	22.6	2.7	87.6	166	240.9
10	175	22.6	2.3	104.9	205	395.3

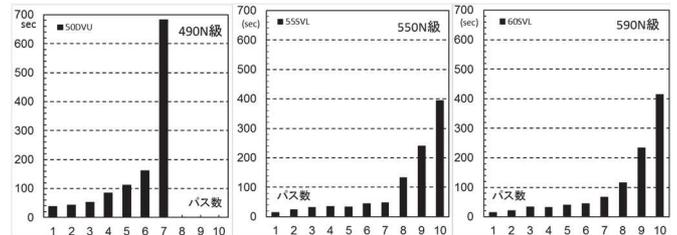


図1 各パスの冷却時間

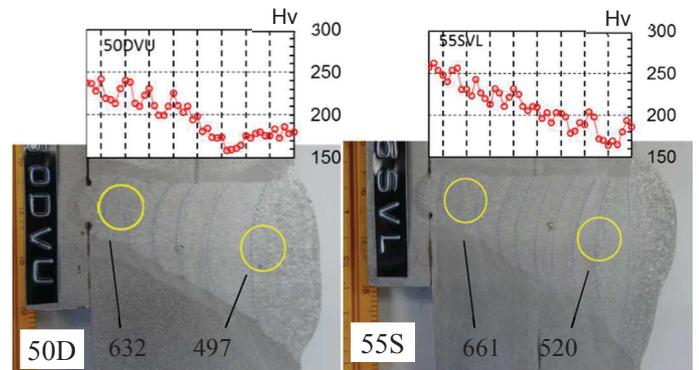


図2 各パスの硬さと DEPO 引張試験
(図中数値は DEPO 引張試験の引張強さ(N/mm²)を示す)

⑤鋼材の引張強さ規格下限値に相当する硬さを 3 式より求めて、この硬さとなる冷却時間を溶接材料の強度区分ごとに 2.1～2.3 式より求めて、この冷却時間に対する入熱を、パス間温度 250 度として、1 式より逆算した。溶接材料強度クラスごとに適用鋼材の引張強さ規格下限値を満足する硬さ、冷却時間および入熱(パス間温度 250℃)を表 2 に示した。

表 2 適用鋼材の引張強さを満足する冷却時間及び入熱

溶接材料	適用鋼材引張強さ	硬さ(Hv)	冷却時間(sec)	入熱(kJ/cm)
490N	490N/mm ²	172	217	63.9
550N	490N/mm ²	172	229	66.0
	550N/mm ²	195	90	38.1
590N	490N/mm ²	172	293	76.2
	550N/mm ²	195	110	42.9
	590N/mm ²	211	61	30.3

⑥前報(その 8)で報告した試験結果と冷却時間を図 5 に示した。鋼材の引張強さ規格下限値に対して、⑤で求めた冷却時間(↓)を図中に示した。

3. 立向溶接の溶接条件

立向溶接の溶接金属の引張強さが適用鋼材の引張強さ規格下限値を満足する溶接条件を適用鋼材強度別に表 3 に示した。板厚により 1 層 1 パスでは表 3 の入熱を超える場合は、1 層 2 パス等とする施工が必要である。

シャルピー吸収エネルギーは、溶接金属の窒素量 100ppm 以下の試験体では、初層側及び表層側で 27J を満足している(前報その 8)ので、表 3 の溶接条件範囲であれば同様に満足すると考える。溶接金属に吸収エネルギー 70J の高靱性を求める場合は、今回試験に用いた 490N 級及び 550N 級溶接材料の銘柄では、溶接条件を設定しても満足できないので、適用鋼材の鋼材強度によらず 590N 級溶接材料を用いることが望ましい。

4. まとめ

本研究では、フラックス入りワイヤの立向溶接の実施工での溶接条件での溶接金属の引張強さを示し、溶接材料強度クラスごとに適用鋼材の鋼材強度を満足する溶接管理条件を提示した。パス間温度が 250℃以下で JIS Z 3313 解説の溶接条件を超える溶接条件を提示した。JIS Z 3313 解説は、フラックス入りワイヤが立向溶接に多用されることを前提に、実用的な溶接条件が提示されることを期待する。

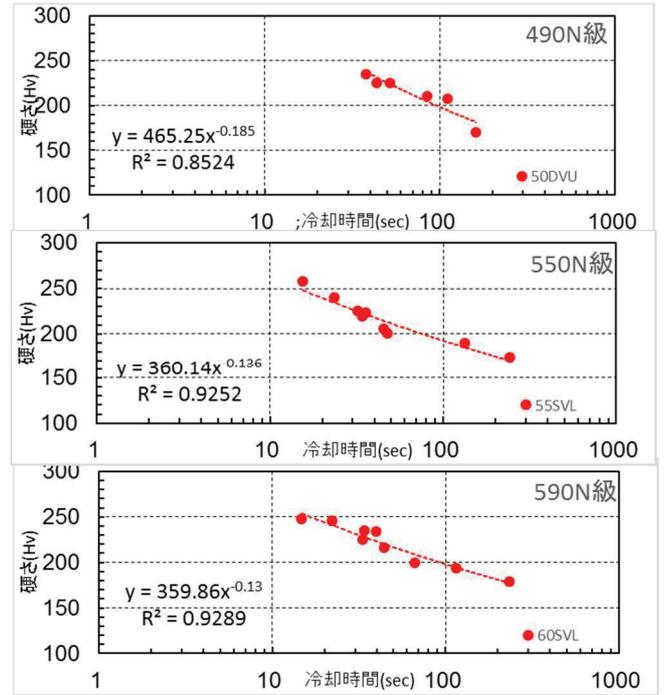


図 3 各パスの硬さと各パスの冷却時間

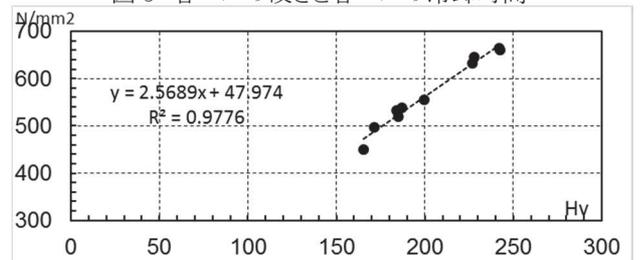


図 4 硬さと引張強さ

表 3 フラックス入りワイヤの立向姿勢の溶接条件

溶接材料	適用鋼材強度		
	490N 級	550N 級	590N 級
490N 級	63kJ/cm, 250℃	—	—
550N 級	66kJ/cm, 250℃	38kJ/cm, 250℃	—
590N 級	76kJ/cm, 250℃	42kJ/cm, 250℃	30kJ/cm, 250℃

謝辞:本研究は AW 検定協議会研究評価委員会 WG18 として実施した。試験に際しご協力頂いた各位に謝意を表する

参考文献:

- 1)溶接・接合技術概論 溶接学会編 産報出版発行
- 2)加賀美ら;立向突合せ溶接の溶接条件と溶接金属の性能(溶接条件と管理方法) 日本建築学会大会学術講演梗概集 2011 年
- 3)小林ら;梁ウェブ現場溶接を想定した立向上進溶接部の性能確認報告、日本建築学会大会学術講演梗概集 2012 年

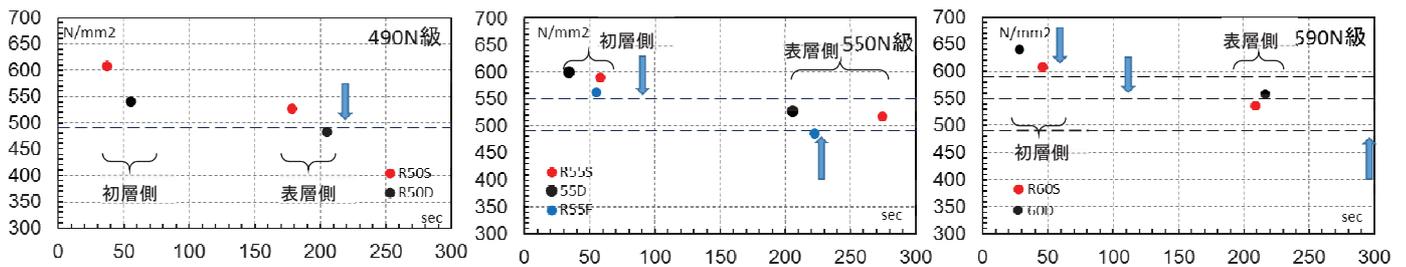


図 5 引張強さと冷却時間

*1 日建設計,*2 日本設計,*3 大成建設,*4 類設計室,
*5 安井建築設計事務所,*6 神戸製鋼所

*1 Nikken sekkei Ltd.*2 Nihon Sekkei Inc.*3 Taisei Corporation
*4 Rui.Sekkeisitsu.Co.Ltd. *5Yasui Architects,INC.*6Kobe Steel,Ltd.