

§ 4. 溶接割れ試験

4-1. 試験体

本 WG では、橋梁の溶接継手に多く用いられているすみ肉溶接継手に着目し、4 回の溶接割れ試験を実施して溶接割れの発生条件について検討を行った。各試験工程における試験条件を表 4-1-1 に、溶接割れ試験に用いた試験体の形状を図 4-1-1 に示す。

(1) 試験工程 1

試験体形状は、日本海事協会の鋼船規則検査要領¹⁾のすみ肉溶接継手試験体とした。鋼船規則検査要領では、この試験体は高張力鋼用非低水素系溶接棒を使用する場合の確認試験用としているが、既往のすみ肉溶接割れの検討に使用された試験体形状に近く²⁾、最近のすみ肉溶接サイズの検討^{3),4)}等にも使用されていることを勘案して、本 WG でもこの試験体を基本とすることとした。

試験体の立板については、その面外剛性が小さいと溶接割れが生じやすいという検討事例⁶⁾や、板厚が薄い場合には溶接による熱影響が板の裏面まで達して面内曲げが生じることから、拘束割れではなく変形割れが生じやすくなる等の検討結果^{2),5)}がある。本 WG では変形が生じやすく割れに対して厳しいと考えられる板厚 12mm を採用することとした。

試験体に用いる材料の選定にあたっては、現在の鋼材と比較して溶接割れが発生しやすいと考えられる製造年代の古い鋼材（以下、古材）を入手することを計画した。施工部会内で古材の入手の可能性について調査を行った結果、1890～1960 年代に製作された 3 橋梁で使用されていた古材を入手することができた。表 4-1-2 に古材を提供していただいた機関と古材が使用されていた供用中の橋梁名を示す。古材はすみ肉溶接継手試験体の着目材片となる底板（下板）に用い、溶接割れ試験に先立って古材の化学成分の分析を行い、 P_{CM} 及び C_{eq} 等の溶接性評価値を計算した。また、試験体の立板の鋼材強度は、着目材片の底板と同等として SM400A 材を用いた。

最初の試験工程 1 では、拡散性水素の影響に着目した。試験体の製作段階で試験溶接部に組立溶接を行い、溶接割れの発生因子の一つである立板の変形の影響を排除した。試験は恒温恒湿室で実施し、夏季と冬季の温度に対して高湿度となる溶接環境として、試験温度の差による影響を比較した。また、溶接材料には水素量の高いイルミナイト系を選定した。溶接材料の乾燥条件は、乾燥炉から取出した直後に試験体の溶接を行う「乾燥」と、高湿度の恒温恒湿室に 4 時間放置した後に試験体の溶接を行う「吸湿」の 2 条件として、乾燥条件の違いによる影響を比較した。試験温度と溶接材料の乾燥条件の組合せから 4 ケースについて拡散性水素量の測定をガスクロマトグラフ法で行った。

(2) 試験工程 2

試験条件に立板の変形の影響を加えて溶接割れ試験を行った。試験体の製作段階で試験溶接部に組立溶接を行っていない。試験体の着目材片に用いる鋼材は、試験工程 1 における試験体の底板の縁端より材料を切出した。試験体の形状は、採取できた材料の寸法から図 4-1-1 のタイプ 2 とした。試験体の立板の形状、板厚、及び鋼材強度は、試験工程 1 と同様で板厚 12mm の SM400A 材である。

また、試験工程 2 では、2008 年に製造された P_{CM} の高い鋼材 (SMA490CW) を入手し、鋼材の P_{CM} の影響についても試験条件に加えた。その鋼材の P_{CM} 値は、ミルシートの値で 0.256% であった。試験体の形状は、入手できた材料の寸法から図 4-1-1 のタイプ 3 とし、試験体の立板には板厚 12mm の SM490YA 材を用い

た。

試験体の溶接は、橋梁製作工場の実験室で湿度の高い時期に行った。試験で用いた溶接材料はイルミナイト系で、実験室内で4時間放置した後に試験体の溶接を行っている。試験工程1における拡散性水素量の測定結果では、試験温度及び溶接材料の乾燥条件の違いによって、拡散性水素量に大きな差は見られなかった。この結果をもとに試験工程2では、試験温度と溶接材料の乾燥条件の組合せを1ケースとした。

(3) 試験工程 3

試験工程3では、溶接材料の強度の影響に着目し、490N/mm²級の低水素系の溶接材料を用いて試験体の溶接を行った。試験体の着目材片に用いた鋼材は、古材と高P_{CM}の鋼材の2種類である。古材については、試験工程2と同様に試験工程1の試験体の縁端より材料を切出した。高P_{CM}の鋼材は試験工程2と同じSMA490CW材である。試験体の形状は、材料の寸法から図4-1-1のタイプ2及びタイプ3とした。立板の板厚は12mm、鋼材強度は底板と同程度で、試験条件に立板の変形の影響を加えるため組立溶接は行っていない。

490N/mm²級の溶接材料の使用により、古材を用いた試験ケースでは母材より溶接材料の強度が高い設定となり、高P_{CM}の鋼材を用いた試験ケースでは母材と溶接材料の強度が同等の設定となる。試験体の溶接は、橋梁製作工場の実験室で湿度の高い夏季に行った。試験前に溶接材料は実験室内で4時間放置している。

(4) 試験工程 4

最後の試験工程4では、鋼材のP_{CM}と溶接材料の強度に着目した。入手した古材の中からP_{CM}の高い材料を2種類選定し、試験体の着目材片に用いた。そのP_{CM}値は0.266%と0.232%である。また、P_{CM}値が0.251%と高い2011年に製造されたSM490YA材を新たに入手して試験ケースに加え、試験工程4では3種類の鋼材を用いた。試験体形状は、試験工程1と同様の日本海事協会の鋼船規則検査要領のすみ肉溶接継手試験体(図4-1-1のタイプ1)としているが、試験条件に立板の変形の影響を加えるため試験溶接部に組立溶接は行っていない。立板の板厚は12mmで、鋼材強度は底板と同等している。

溶接材料については、イルミナイト系及び低水素系を用いた。低水素系の溶接材料では、430N/mm²、490N/mm²、及び590N/mm²の3種類の強度を用いて溶接材料の強度の影響を比較した。古材を用いた試験ケースでは、母材に対して溶接材料の強度は同等、1ランク上、及び2ランク上の設定となる。高P_{CM}の鋼材を用いた試験ケースでは、母材に対して溶接材料の強度は1ランク下、同等、及び1ランク上の設定となる。

試験は恒温恒湿室で実施し、夏季の温度に対して高湿度となる溶接環境とした。溶接材料の乾燥条件は、高湿度の高温恒湿室に4時間放置した後に試験体の溶接を行う「吸湿」とし、1ケースのみ乾燥炉から取出した直後に試験体の溶接を行う「乾燥」として水素量の比較を行った。拡散性水素量の測定は、低水素系の溶接材料についてガスクロマトグラフ法で行った。

表 4-1-1 溶接割れ試験工程と試験条件

試験工程	試験ケース	試験体形状	試験条件											
			使用鋼材					溶接材料			溶接環境			
			下板 (着目材片)			立板		材料種別	材料強度 (N/mm ²)	乾燥状態	温度	湿度		
製造年代	板厚 (mm)	鋼材強度 (N/mm ²)	板厚 (mm)	鋼材強度 (N/mm ²)										
試験工程 1 2011年 7月	1-E1	タイプ 1 組立溶接有	1896年 古材	31	400	12	400(A)	ルニテ系	430	乾燥	高温	高湿		
	2-E2									吸湿	高温			
	3-E3									乾燥	低温			
	4-E4									吸湿	低温			
	5-S1		1961年 古材	10		乾燥				高温				
	6-S2					吸湿				高温				
	7-S3					乾燥				低温				
	8-S4		1903年 古材	40		吸湿				低温				
	9-T1					吸湿				高温				
	10-T2					吸湿				高温				
試験工程 2 2012年 5月	11-E6	タイプ 2	1896年 古材	31	400	12	400(A)	ルニテ系	430	吸湿	標準	高湿		
	12-E7													
	13-W1	タイプ 3	2008年 高P _{CM}	27	490(W)	12	490(Y)							
試験工程 3 2012年 8月	14-T3	タイプ 2	1903年 古材	40	400	12	400(A)	低水素系	490	吸湿	高温	高湿		
	15-T4													
	16-W2	タイプ 3	2008年 高P _{CM}	27		490(W)	12						490(Y)	
	17-W3													
試験工程 4 2012年11月	18-E8	タイプ 1 組立溶接無	1896年 古材	31	400	12	400(A)	ルニテ系	430	吸湿	高温	高湿		
	19-E9							低水素系	430					
	20-E10								490					
	21-K1		2011年 高P _{CM}	34		490(Y)		12	490(Y)	ルニテ系			430	吸湿
	22-K2												490	
	23-K3									低水素系			430	乾燥
	24-K4												490	
	25-K5												590	
	26-S5									1961年 古材			10	400

注記【使用鋼材】

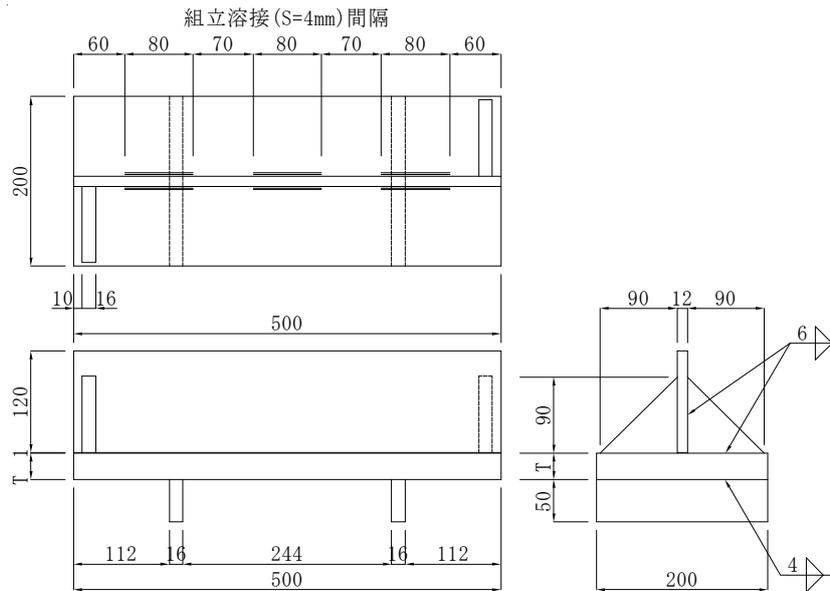
鋼材強度400(A) JIS G3106 SM400A
 鋼材強度490(Y) JIS G3106 SM490YA
 鋼材強度490(W) JIS G3114 SMA490CW

注記【溶接材料】

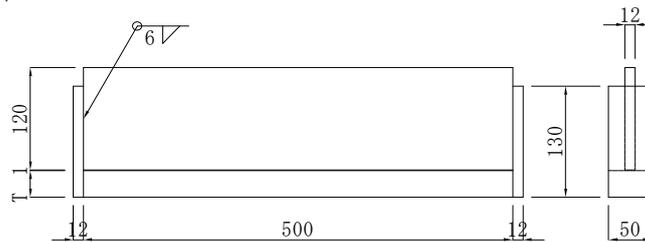
ルニテ系430 JIS Z3211 E4319
 低水素系430 JIS Z3211 E4316
 低水素系490 JIS Z3211 E4916
 低水素系590 JIS Z3211 E5916

表 4-1-2 鋼材の提供機関と供用時の橋梁名

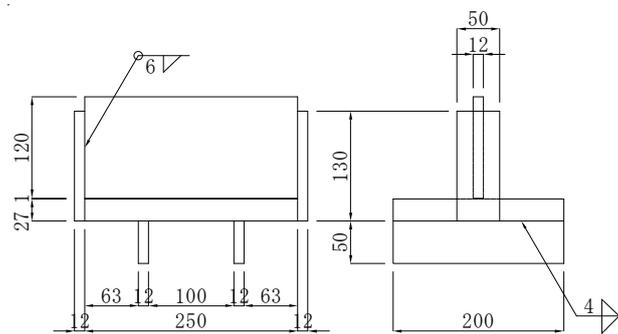
鋼材提供機関	供用時橋梁名	橋梁製作年	鋼材強度	鋼材板厚
横浜市 道路局橋梁課	旧 江ヶ崎跨線橋	1896年	推定400N/mm ²	31mm
関東地方整備局 東京国道事務所	新宿跨線橋	1961年	推定400N/mm ²	10mm
公益財団法人 鉄道総合技術研究所	旧 八敷代橋梁	1903年	推定400N/mm ²	40mm



(a) 試験体 タイプ1 組立溶接有



(b) 試験体 タイプ2



(c) 試験体 タイプ3

図 4-1-1 試験体形状

4-2. FEMによる拘束度解析

本試験で用いた試験体の立板厚は薄く、割れに寄与するのは拘束ではなく変形だと考えられるが、種々の試験体形状を定量的に評価する指標のひとつとして拘束度を取りあげ、FEM解析により算出した。解析対象は本WGで用いた試験体と文献3),4)で用いられたすみ肉溶接試験体である。文献6)にあるように拘束度は第2ビードの方が大きくなるが、後述のように割れが発生するのは第1ビードであるため、第1ビードのみに着目することとした。

解析にはABAQUS ver. 6.11.2を用いた。図4-2-1に解析モデルの一例を示す。鋼材の弾性係数は206,000N/mm²、ポアソン比は0.3とした。荷重条件について、文献6)では立板に単位荷重を与え、その結果得られた平均変位量を用いて拘束度を算出しているが、ここで用いたモデルは厳密には線形挙動を示さないことを考慮し、溶接区間400mmの立板の角部の全線にわたり鉛直方向-1mmの強制変位を与え、鉛直方向反力の平均値から拘束度を算出することとした。強制変位点近傍のメッシュサイズは4mmである。解析モデルの拘束条件は架台(ストロングバック)下面を完全拘束、架台のないタイプ2試験体では底板下面が完全拘束された定盤と接触するものとしてモデル化した。なお、拘束材と架台のすみ肉溶接部(ルートギャップ0mm)、タイプ2試験体の底板下面と定盤上面間には面接触を定義(摩擦係数0.0mm)、幾何学的非線形性も考慮した。

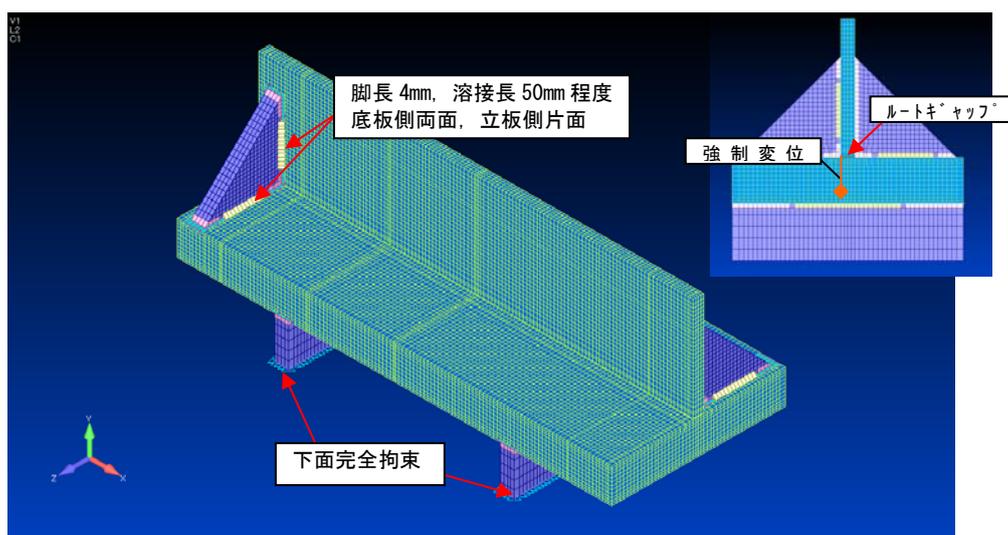
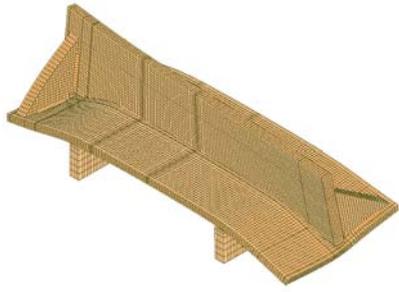
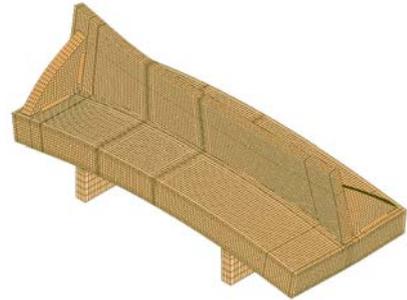


図 4-2-1 解析モデルの一例

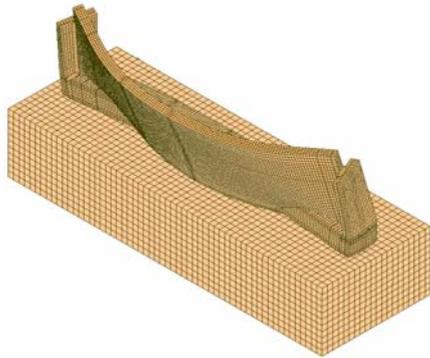
図4-2-2に解析より得られた30倍変形図の一例を、表4-2-1に算出した拘束度の一覧を示す。変形図より各試験体とも立板の面外変形が確認できる。また、拘束度に関しては底板厚の増加と共に大きくなること、立板の長手方向両端を固定したタイプ2、タイプ3試験体で大きめとなっていることがわかる。



(a) タイプ 1 (底板厚 10mm, 立板厚 12mm)



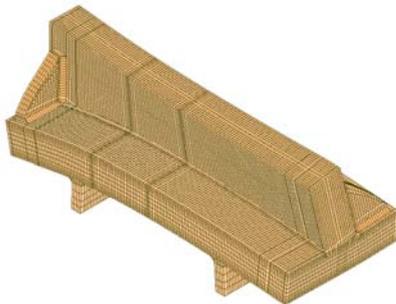
(b) タイプ 1 (底板厚 40mm, 立板厚 12mm)



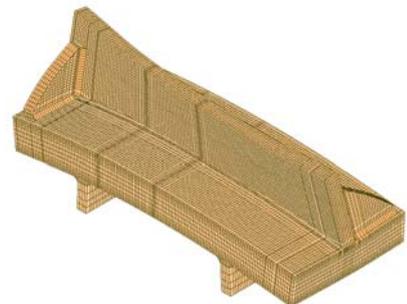
(c) タイプ 2 (底板厚 31mm, 立板厚 12mm)



(d) タイプ 3 (底板厚 27mm, 立板厚 12mm)



(e) タイプ 1 (底板厚 50mm, 立板厚 50mm)



(f) タイプ 1 (底板厚 58mm, 立板厚 19mm)

図 4-2-2 代表的な試験体の 30 倍変形図

表 4-2-1 拘束度解析結果一覧

	底板厚 (mm)	立板厚 (mm)	形状	拘束係数 (N/mm ² ・mm)	拘束度 (N/mm・mm)
当 WG	10	12	タイプ 1	7.3	87.4
	31	12	タイプ 1	34.7	416.5
	34	12	タイプ 1	38.8	465.4
	40	12	タイプ 1	55.7	668.2
	31	12	タイプ 2	143.9	1726.4
	40	12	タイプ 2	141.6	1699.6
	27	12	タイプ 3	131.9	1582.4
文献 3)	50	12	タイプ 1	67.6	810.6
	50	12	タイプ 1	45.2	858.6
	50	12	タイプ 1	18.1	906.5
	58	12	タイプ 1	51.2	973.0

4-3. 試験方法

溶接割れ試験の流れを図 4-3-1 に示す。

溶接作業は、被覆アーク溶接棒を用い、溶接環境が悪条件となる高温を基本とした。高温・低温で温度差による影響を比較するため、試験工程 1 及び試験工程 4 は恒温恒湿室内で溶接作業を実施した。また、溶接中の立板の変形状況を確認するため、試験工程 2 で変位計を設置し動的に測定した。

試験条件に関する確認として、入熱量の確認、拡散性水素量の測定、試験体の形状の測定を実施した。

溶接割れは、外観検査及びマクロ試験により確認した。

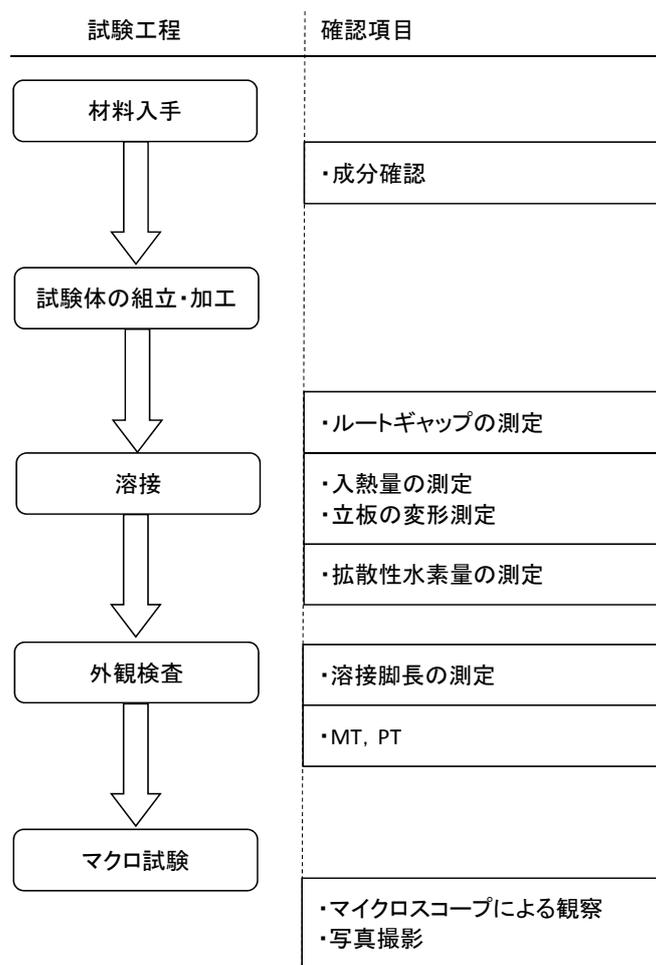


図 4-3-1 試験の流れ

4-3-1. 溶接作業

溶接作業順序を図 4-3-2 に示す。試験工程 1 の試験体形状タイプ 1 は、図 4-3-1 (a) に示すように組立溶接を片側 3 箇所を実施して被覆アーク溶接を順番に実施した。試験工程 4 の試験体形状タイプ 1 は、組立溶接を実施せずに同様の順番で被覆アーク溶接を実施した。試験工程 2 及び試験工程 3 は、底板の材料入手量が少量であったため、溶接長 500mm の試験体形状タイプ 2 と 250mm の試験体形状タイプ 3 の 2 種類で実施した。溶接作業状況を写真 4-3-1 に示す。

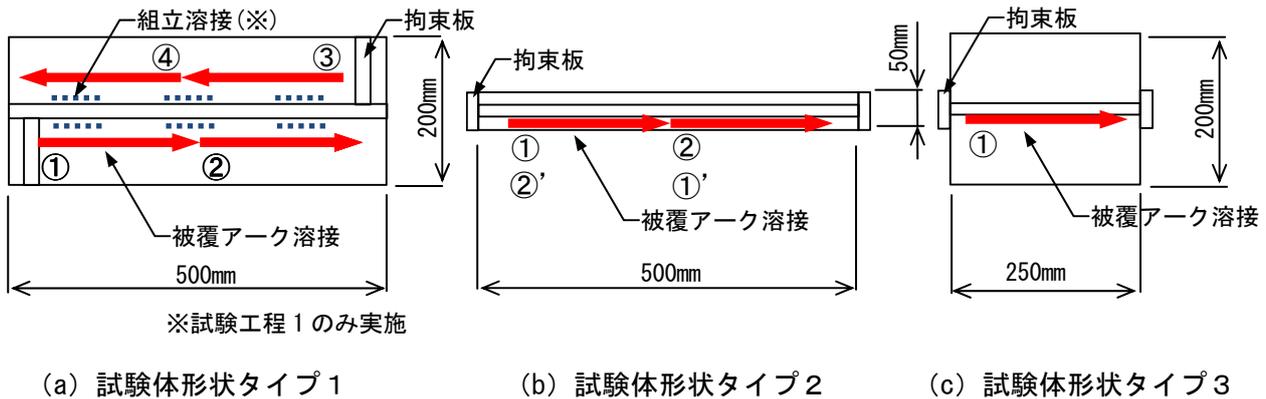


図 4-3-2 溶接作業順序



(a) 試験体形状タイプ 1

(b) 試験体形状タイプ 2

(c) 試験体形状タイプ 3

写真 4-3-1 溶接作業状況

4-3-2. 溶接条件及び試験体条件

溶接割れ試験での各種測定結果を表 4-3-1 に示す。

溶接環境として、作業場の温度（気温）と湿度を測定した。恒温恒湿室で作業した試験工程 1 と試験工程 4 はおおむね目標の環境で溶接作業を行った。試験工程 2 と試験工程 3 は、橋梁製作工場内の実験室で実施し、雨天の影響で湿度 80%弱の高湿状態で溶接作業を行った。

溶接時の入熱量は、溶接時間と溶接長を実測して計算した。入熱量の最大値は 12,553J/mm、最小値は 1,179J/mm で、平均値は 1,656J/mm であった。

試験体の形状条件として、ルートギャップは、1.0mm を目標として試験体を製作し、試験体別の平均でおおむね 0.8mm～1.2mm の範囲となり、測定値全体の平均値は 1.0mm であった。溶接脚長は、試験体個別の平均でおおむね 6mm であった。

4-3-3. 溶接棒及び拡散性水素量の測定

溶接材料は、イルミナイト系と低水素系による拡散性水素量の影響、強度の影響に着目し、被覆アーク溶接用溶材の4種類を選定した。溶接棒の機械的性質及び化学成分の公称値を表 4-3-2 に示す。

試験工程 1 及び試験工程 4 において、拡散性水素量の測定を実施した。溶接割れ試験実施の 72 時間経過後、ガスクロマトグラフ法 (JIS Z3118) に準じて測定した。イルミナイト系溶接棒を使用した場合と低水素系溶接棒を使用した場合の測定結果をそれぞれ表 4-3-3 と表 4-3-4 に示す。イルミナイト系の溶材では水素量が概ね 40ml/100g 程度、低水素系では 5 ml/100g 程度であった。

表 4-3-2 溶接棒 (公称値)

	被覆剤	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	化学成分 (%)						
				C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
E4319	イルミナイト系	400	450	0.10	0.09	0.39	0.016	0.008		
E4316	低水素系	400	460	0.04	0.41	0.34	0.008	0.005		
E4916		480	550	0.07	0.62	1.18	0.011	0.008		
E5916		540	640	0.07	0.042	1.12			0.73	0.22

表 4-3-3 拡散性水素量 (イルミナイト系)

溶接棒	試験片重量 (g)			水素量		
	溶接後	溶接前	溶着量	ml	ml/100g	平均
E4319 (HD)	99.41	95.14	4.27	1.66	39	42
	99.18	94.87	4.32	1.81	42	
	99.29	95.08	4.22	1.84	44	
E4319 (HW)	98.79	95.17	3.62	1.57	44	43
	99.14	95.16	3.98	1.64	41	
	99.20	94.98	4.22	1.84	44	
E4319 (LD)	100.13	94.98	5.15	1.87	36	36
	100.05	95.07	4.98	1.83	37	
	100.40	95.25	5.15	1.87	36	
E4319 (LW)	99.65	94.86	4.79	2.01	42	41
	99.39	94.93	4.47	1.87	42	
	99.64	94.30	5.35	2.15	40	

記号

H : 高温

L : 低温

D : 乾燥

W : 吸湿

表 4-3-4 拡散性水素量 (低水素系)

溶接棒	試験片重量 (g)			水素量		
	溶接後	溶接前	溶着量	ml	ml/100g	平均
E4916 (D)	101.90	94.60	7.30	0.46	6.3	6.4
	101.92	94.58	7.34	0.47	6.4	
	101.51	94.47	7.04	0.46	6.5	
E4916 (W)	102.36	94.70	7.66	0.60	7.8	7.5
	101.11	94.39	6.72	0.48	7.1	
	101.68	94.50	7.18	0.55	7.7	
E5916	100.86	94.58	6.28	0.44	7.0	6.7
	101.18	94.67	6.51	0.45	6.9	
	100.89	94.62	6.27	0.39	6.2	
E4316	100.85	94.53	6.32	0.29	4.6	4.3
	100.79	94.69	6.10	0.25	4.1	
	101.35	94.42	6.93	0.29	4.2	

4-3-4. 外観検査

マクロ試験に先立ち溶接部の外観検査を実施した。磁粉探傷試験 (MT) により、磁粉模様を確認した後、写真で記録するため浸透探傷試験 (PT) により、指示模様を確認した。MT と PT の確認状況を写真 4-3-2 に示す。全ての試験体で表面きずは確認されなかった。



(a) MT 作業状況



(b) PT 確認状況

写真 4-3-2 外観検査状況

4-3-5 マクロ試験

JIS G 0553 に準拠してエッチングを行った。試験工程 1 の 2-E2 と 9-T1 の試験体は、割れを生じやすい場所を確認するため、10mm ピッチに切断し、マイクロスコープを用いて割れの観察を行った。その他の試験体については、5 断面を抽出して切断しマクロ試験片を採取した。

4-3-6. 立板の変形測定

溶接中における立板の面内方向の変形が溶接割れに及ぼす影響を考察するため、試験工程 2 では試験体の溶接中におけるルート間隔の開閉を動的に測定した。試験体の形状は図 4-1-1 に示すタイプ 2 とタイプ 3 で、試験ビート裏面側の溶接線中央部に変位計とクリップゲージを配置した。溶接長の長いタイプ 2 については、試験ケース 11-E6 及び 12-E7 の 2 ケースで変位の測定を行い、溶接順序の影響を比較した。変位計及びクリップゲージの設置要領を図 4-3-2 に、測定状況を写真 4-3-3 に示す。また、溶接前における試験体のルート間隔の測定結果を表 4-3-5 及び図 4-3-3 に示す。

まず、試験ケース 11-E6 と 12-E7 の測定結果から、溶接順序の影響を比較する。両試験ケースとも 1 溶接線を 2 回に分けて溶接を行っているが、それぞれの溶接順序は図 4-3-4 に示すように、11-E6 は後退法により、12-E7 は前進法により行っている。図 4-3-5 の (a) と (b) で、ルート間隔の変位の測定結果を比較すると、溶接順序の違いによってルート間隔の収縮量に大きな差がみられる。変位計の測定値では、後退法の 11-E6 の変位は前進法の 12-E7 の約 1/3 であった。また、変位の挙動でも相違がみられ、11-E6 ではルート間隔が収縮する方向のみに変位しているのに対し、12-E7 では僅かに開いた後に収縮する方向へ変位している。

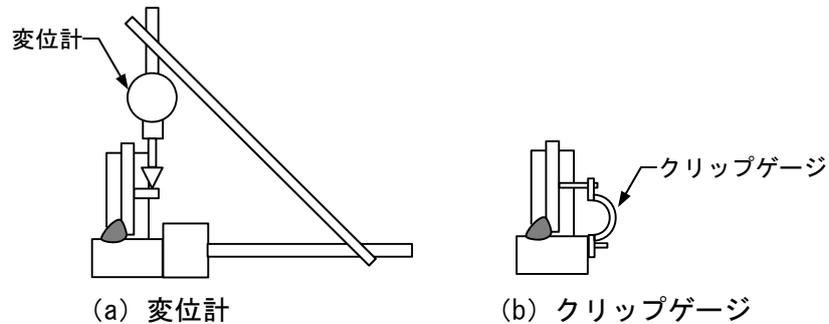


図 4-3-2 立板変形の測定方法



写真 4-3-3 設置状況

表 4-3-5 ルート間隔

試験 ケース	①	②	③	④	⑤
	mm	mm	mm	mm	mm
11-E6	1.2	1.2	1.4	1.2	1.1
12-E7	1.2	1.1	1.3	1.1	1.0
13-W1	-	-	1.0	-	-

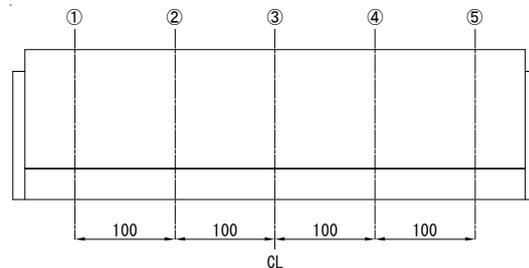


図 4-3-3 ルート間隔測定位置

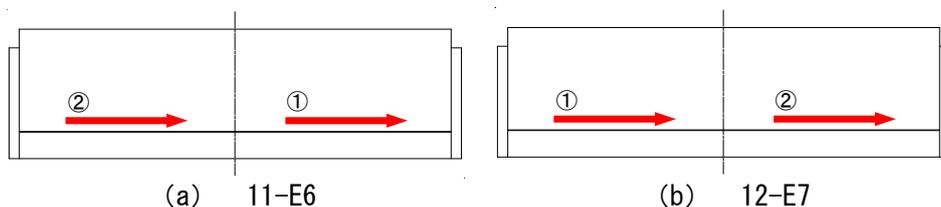
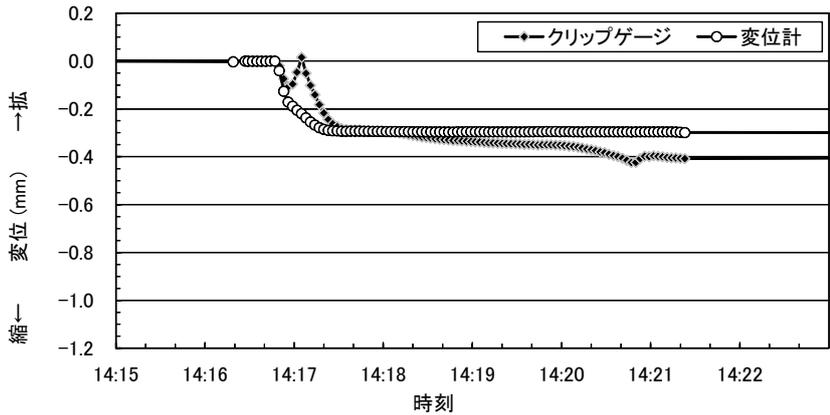


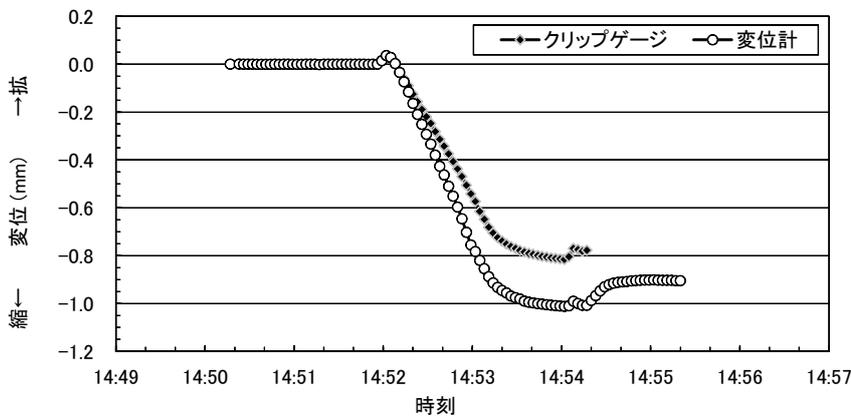
図 4-3-4 溶接順序



(a) 11-E6



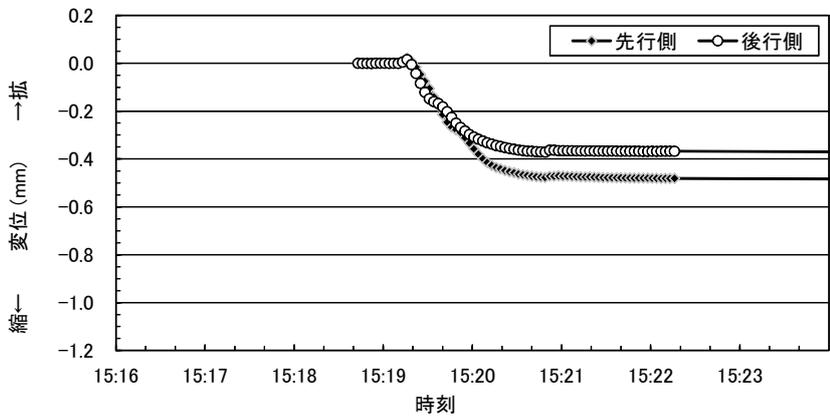
写真 4-3-4 計測機器配置状況



(b) 12-E7



写真 4-3-5 クリップゲージ設置状況



(a) 13-W1



写真 4-3-6 計測機器配置状況

図 4-3-5 変形測定結果

次に、試験ケース 12-E7 と 13-W1 の測定結果から、試験体の形状、すなわち拘束度の影響を比較する。図 4-3-5 の (b) と (c) でルート間隔の変位の挙動をみると、両者とも僅かに開いた後に収縮する方向へ変位している。このルート間隔の開く挙動が文献²⁾⁵⁾に示される変形割れの発生要因と考えられる。また、変位計の測定値では、13-W1 の変位は 12-E7 の約 1/2 であった。表 4-2-1 の FEM による拘束度の解析結果によると、12-E7 の拘束度は $1,726\text{N/mm}\cdot\text{mm}$ 、13-W1 は $1,582\text{N/mm}\cdot\text{mm}$ で僅かに 12-E7 方が若干高い。今回の測定結果の範囲では、拘束度の高い方の試験ケースにおけるルート間隔の変位が大きく、ルート間隔の変位と計算上の拘束度に相関はみられない。

4-4. 試験結果

4-4-1. 供試鋼材の化学成分分析結果

実験に先立ち、収集した鋼材の化学成分を調査した。古材については、直径 18mm 程度の円筒形部材を電動磁気ボール盤のコアドリルを用いて採取し、この断面を研磨し、JIS G1253（鉄及び鋼—スパーク放电発光分光分析方法）にしたがって調査した。ミルシートが入手できた材料はミルシート値を用いて 2-2-1. で示した式(1), (3), (4), (5)に示す C_{eq} , P_{CM} , P_N , CEN を算出した。なお、試験工程 1 と 4 については立板の化学成分を調査した。また、後述する 4-4-3 では文献4)の結果について考察するため、これらをあわせて表 4-4-1 にまとめた。

化学成分のうち、炭素の含有量に着目すると、製造年次の新しい 2008 年の SMA490CW(t=34) や 2011 年の SM490Y(t=34) はそれぞれ 0.13%, 0.16% と比較的低いですが、製造年次の古い材料は 0.19%~0.21% とやや高くなっている。同様に Mn に着目すると、製造年次の新しい鋼材は 1.31%~1.43% であることにに対し、古材は 0.32%~1.02% と低めであった。鋼材強度が異なると考えられるので単純な比較はできないが、古材は C 量を高くして強度を確保していることにに対し、現在の鋼材は C 量を減らし、Mn などの合金元素の成分で強度を確保しているようにも見える。

炭素当量に関するパラメータに着目すると、 P_{CM} が最も高いのは 1896 年の江ヶ崎跨線橋(t=31) で 0.266 であり、次いで 2008 年の SMA490CW(t=34) が 0.256 であった。ところが C_{eq} が最も高かったのは 2008 年の SMA490CW(t=34) が 0.423 であり、次いで 2011 年の SM490Y(t=34) が 0.423 となり、 P_{CM} が最も高かった 1896 年の江ヶ崎跨線橋(t=31) は 0.392 でさほど高くなかった。現在の鋼材を評価する場合、 P_{CM} の方が適切とされているが、両者の式の Mn の係数に着目するとわかるように合金元素の影響が異なっている。江ヶ崎跨線橋の P_{CM} の高さについては、評価に際して注意が必要とも考えられる。合金元素の係数を C の係数とした CEN に着目すると、最も高かったのは 2008 年の SMA490CW(t=34) で 0.418 であり、次いで 2011 年の SM490Y(t=34) が 0.403、江ヶ崎跨線橋は 0.391 となり、 C_{eq} での順序と同じになったが、それらの数値的な差は小さくなっていた。

ところで 1903 年の八敷代橋梁は、製造年次が古いですが炭素当量は相対的に低かった。古い鋼材であっても炭素当量は必ずしも高くない場合もあると考えられる。

表 4-4-1 化学成分分析結果

製造年 (橋梁名)	板厚 (mm)	化 学 成 分 (%)											C_{eq}	P_{CM}	P_N	CEN
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B				
1896年古材 (江ヶ崎跨線橋)	31	0.21	0.01	1.02	0.062	0.030	0.03	0.04	0.04	0.002	0.002	0.0001	0.392	0.266	0.362	0.391
1903年古材 (旧八敷代橋梁)	40	0.19	0.04	0.32	0.017	0.059	0.02	0.02	0.01	0.001	0.001	0.0004	0.249	0.211	0.238	0.250
1961年古材 (新宿跨線橋)	10	0.19	0.08	0.60	0.014	0.024	0.12	0.04	0.03	0.004	0.001	0.0001	0.311	0.232	0.272	0.307
2008年 SMA490CW (試験工程2,3)	27	0.13	0.43	1.31	0.010	0.002	0.31	0.10	0.45	0	0.06	0.0001	0.463	0.256	0.321	0.418
2011年 SM490Y (試験工程4)	34	0.16	0.42	1.43	0.011	0.002	—	0.01	0.02	0.001	0.038	—	0.423	0.251	0.333	0.403
立板SM400 (試験工程1)	12	0.10	0.14	0.70	0.009	0.005	0.01	0.02	0.04	<0.001	<0.001	<0.0001	0.236	0.147	0.190	0.192
立板SM400 (試験工程4)	12	0.18	0.14	0.52	0.009	0.004	—	—	—	—	—	—	0.273	0.211	0.246	0.268
立板SM490A (試験工程4)	12	0.17	0.19	1.31	0.011	0.004	—	—	—	—	—	—	0.396	0.242	0.319	0.381
文献3) E	50	0.16	0.23	1.45	0.015	0.003	0.01	0.02	0.02	0	0	0	0.417	0.242	0.329	0.394
文献3) F	50	0.18	0.38	1.45	0.010	0.002	0.01	0.02	0.02	0	0.06	0	0.446	0.272	0.352	0.439
文献3) G	50	0.17	0.38	1.44	0.110	0.002	0.01	0.02	0.02	0	0.07	0	0.439	0.267	0.420	0.431
文献4) H	50	0.15	0.44	1.50	0.015	0.002	0.01	0.01	0.02	0	0	0	0.423	0.241	0.334	0.389
文献4) I	50	0.16	0.47	1.44	0.010	0.002	0.01	0.01	0.02	0	0.06	0	0.429	0.255	0.336	0.410
文献4) J	50	0.18	0.38	1.46	0.008	0.002	0.01	0.01	0.02	0	0.06	0	0.448	0.273	0.352	0.442

4-4-2. 割れ試験結果

溶接ルート部を起点とするヒールクラックの発生状況を調査するため、マクロ試験を実施した。マクロ断面を観察した結果、割れの疑いのある断面については、マイクロ스코ープで詳細に観察した。

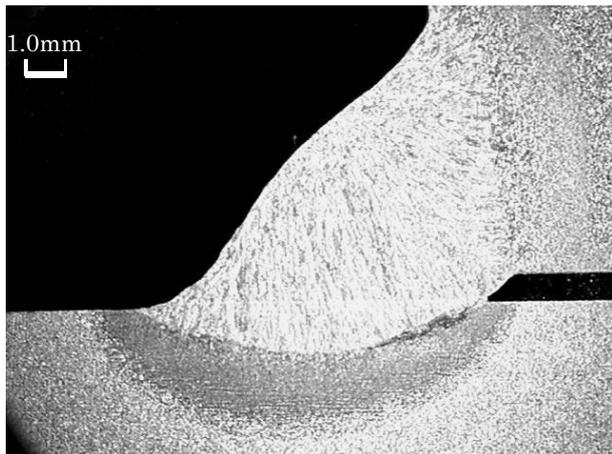
(1) 観察断面

試験工程 1 では、割れの発生位置に関する傾向などを把握するために、2-E2 と 9-T1 の 2 体については溶接線全線を 10mm ピッチ(約 50 断面)で調査し、残りの 8 体については等分割に 6 つの断面を調査した。試験工程 2 では、いずれも溶接線全線を 10mm ピッチで調査し、11-E6 と 12-E7 は約 50 断面、13-W1 は約 25 断面を調査した。試験工程 3 では、既往の研究から割れが生じるのは終端側が多いとの知見を反映し、終端側から 10mm ピッチで 5 断面を調査した。試験工程 4 では、いずれの試験体も溶接線全線を等分割に 6 つの断面で調査した。

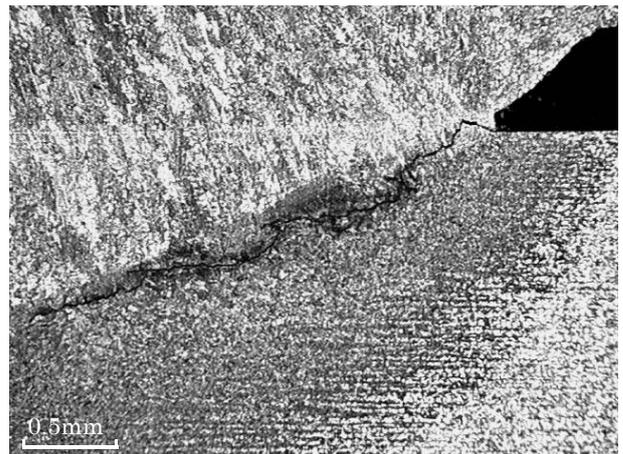
(2) 観察結果

試験工程 1 では、割れのようにも見える試験体が数体あったが、すべてヒールクラックではないと判断した。これらの断面位置には、炭素当量の大小、拡散性水素量の大小、第一ビード／第二ビード、始端側／終端側、などに関する傾向はなかった。なお、試験工程 1 では 500N/mm² 級鋼材用フラックス入りワイヤによる組立溶接を実施したが、組立溶接金属に生じた割れが数体あった。試験工程 2 と試験工程 3 では、試験ケース 13-W1, 16-W2, 17-W3 で明瞭なヒールクラックが確認できたが、試験工程 4 ではすべての試験体で割れはなかった。

(3) ヒールクラック事例

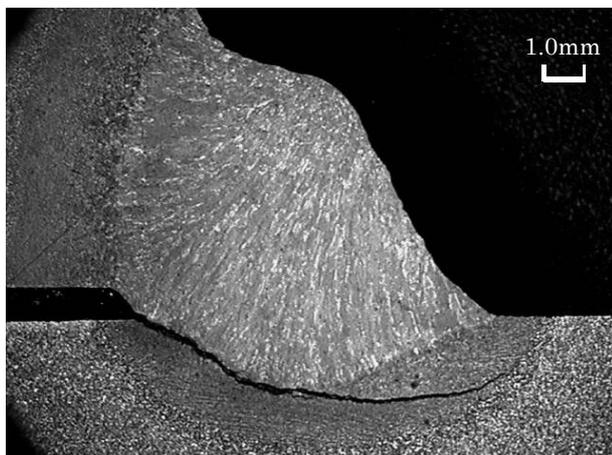


(a) ×25倍

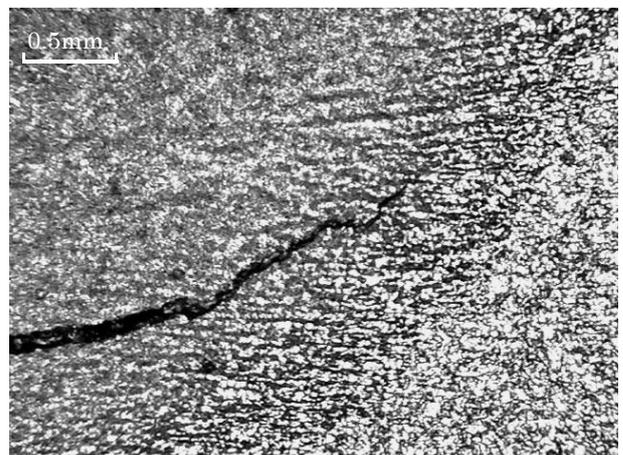


(b) ×100倍

写真 4-4-1 13-W1 (第一ビード側, 始端側から 180mm 位置, 溶接線長 250mm)

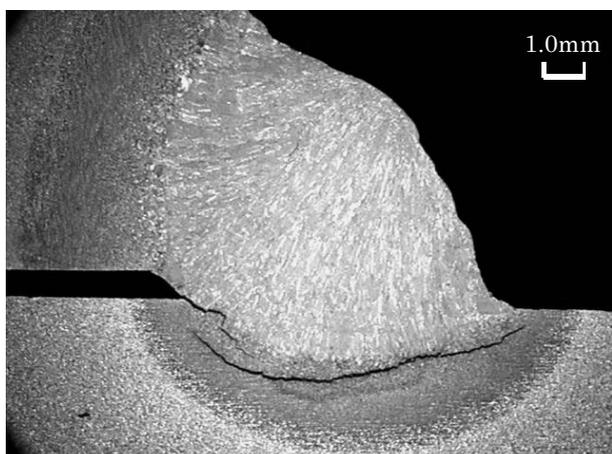


(a) ×25倍

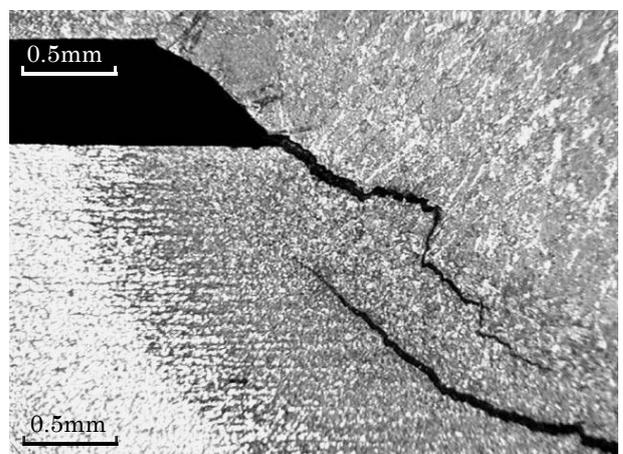


(b) ×100倍

写真 4-4-2 16-W2 (第一ビード側, 始端側から 240mm 位置, 溶接線長 250mm)



(a) ×25倍

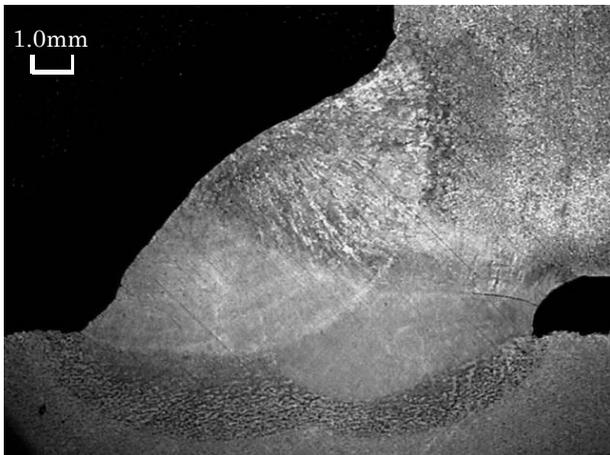


(b) ×100倍

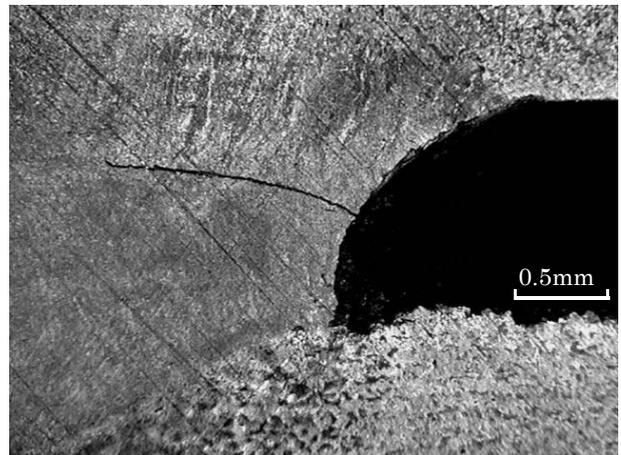
写真 4-4-3 17-W3 (第一ビード側, 始端側から 220mm 位置, 溶接線長 250mm)

(4) 溶接金属の割れ事例

組立溶接金属に生じた割れを写真 4-4-4~4-4-5 に示す。割れは組立溶接内のみにあるため、本溶接の拡散性水素によるものではない。クラックの幅が狭いので、凝固割れではない。すみ肉溶接試験は組立溶接をせずに評価すべきと考えられ、本研究で目的とするヒールクラックとは別のものであるため、これらは割れとして扱わないこととする。

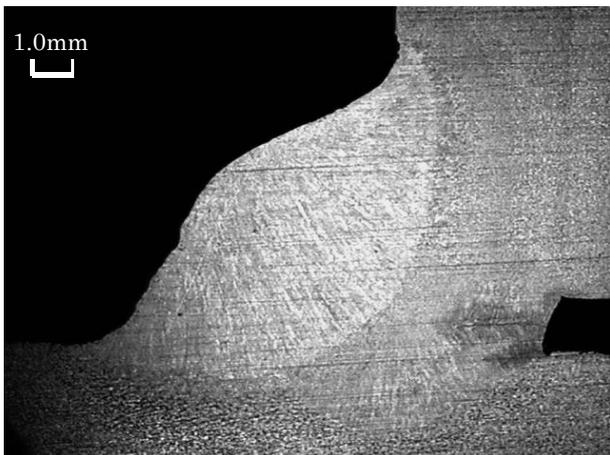


(a) ×25 倍



(b) ×100 倍

写真 4-4-4 9-T1 (第一ビード側, 始端側から 90mm 位置, 溶接線長 500mm)



(a) ×25 倍

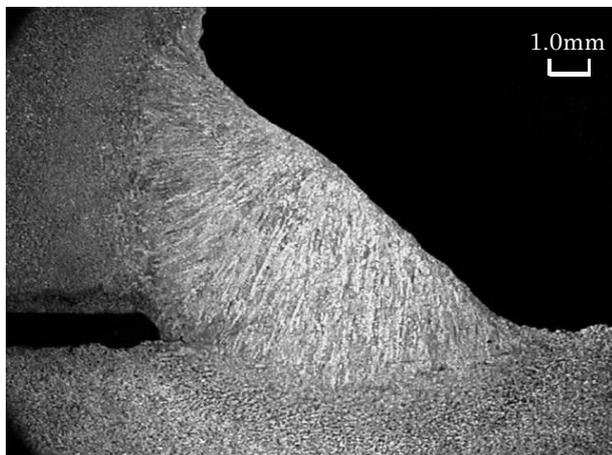


(b) ×100 倍

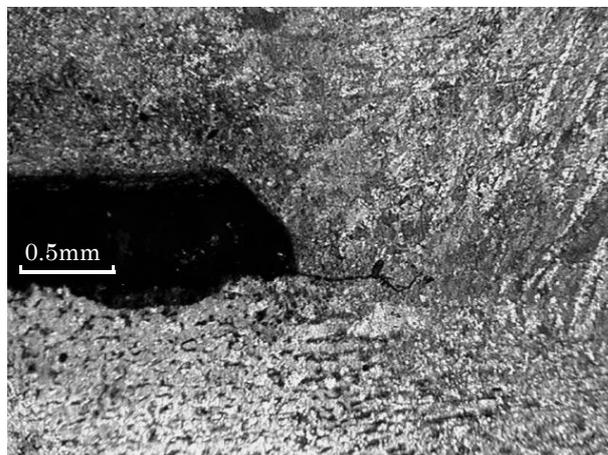
写真 4-4-5 9-T1 (第一ビード側, 始端側から 100mm 位置, 溶接線長 500mm)

(5) マクロエッチのシミ

試験工程 1 で散見された、割れのように見えた事例を写真 4-4-6~4-4-13 に示す。マイクロスコープの写真からは分かりにくいですが、顕微鏡で直接確認した結果よりルート部からフュージョンラインに沿って見える筋状の線は、マクロエッチでの腐食液のシミと判定した。

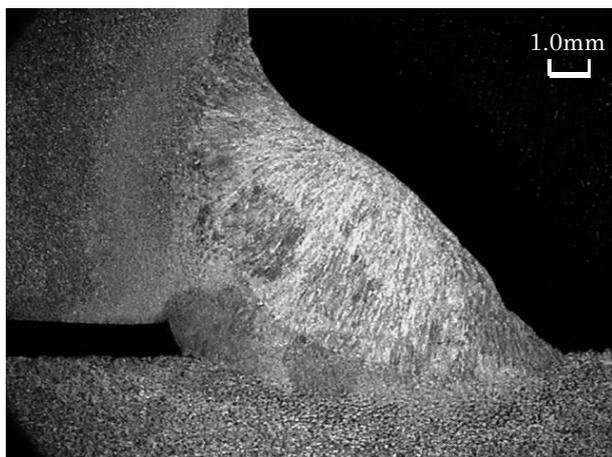


(a) ×25 倍

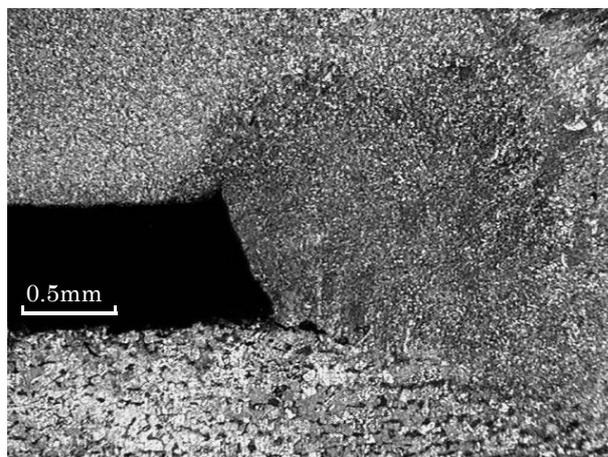


(b) ×100 倍

写真 4-4-6 9-T1 (第一ビード側, 始端側から 380mm 位置, 溶接線長 500mm)

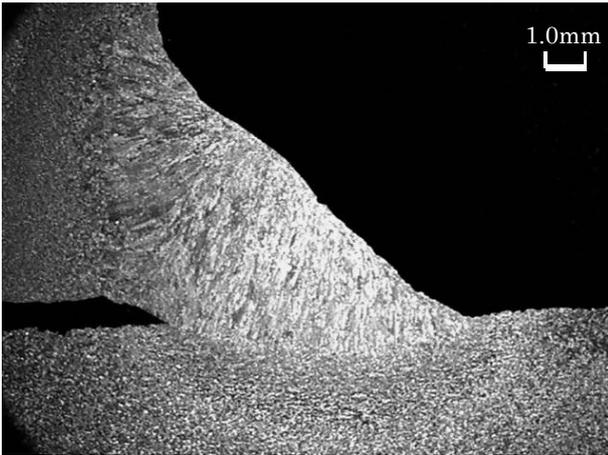


(a) ×25 倍

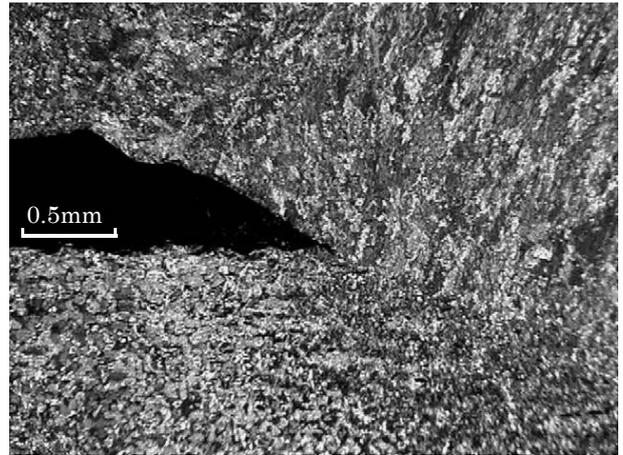


(b) ×100 倍

写真 4-4-7 9-T1 (第一ビード側, 組立溶接, 始端側から 390mm 位置, 溶接線長 500mm)

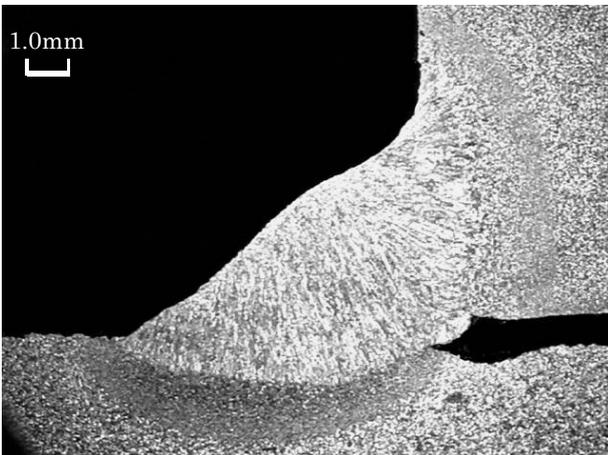


(a) ×25 倍

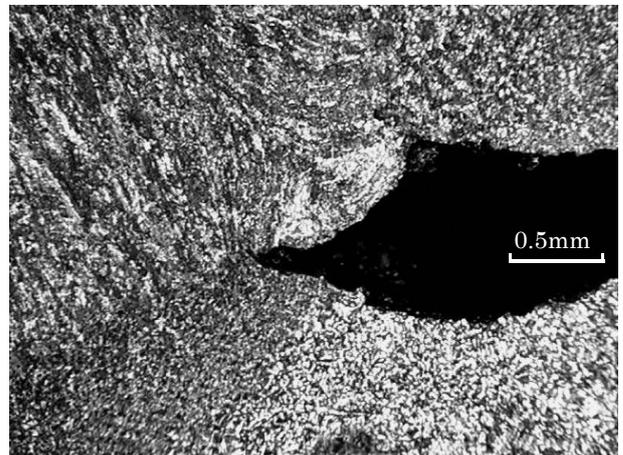


(b) ×100 倍

写真 4-4-8 10-T2 (第一ビード側, 始端側から 230mm 位置, 溶接線長 500mm)

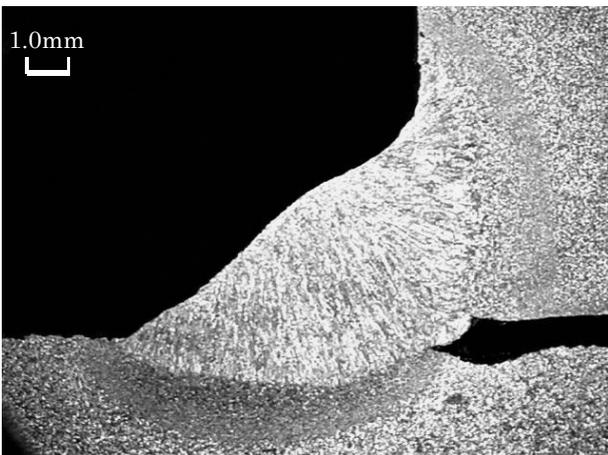


(a) ×25 倍

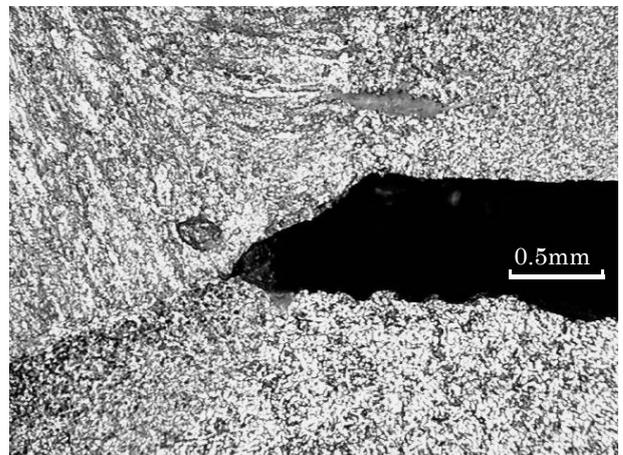


(b) ×100 倍

写真 4-4-9 1-E1 (第二ビード側, 始端側から 370mm 位置, 溶接線長 500mm)

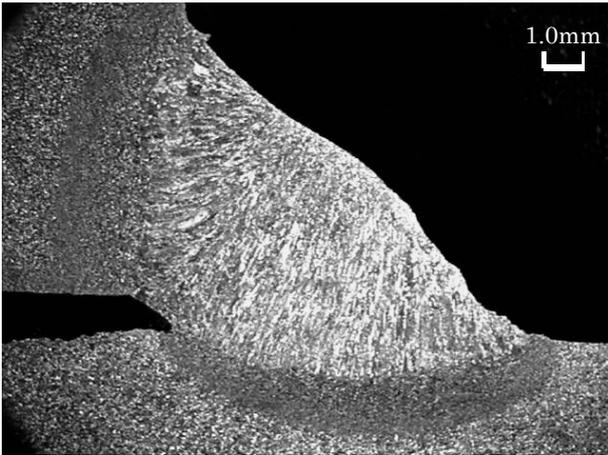


(a) ×25 倍

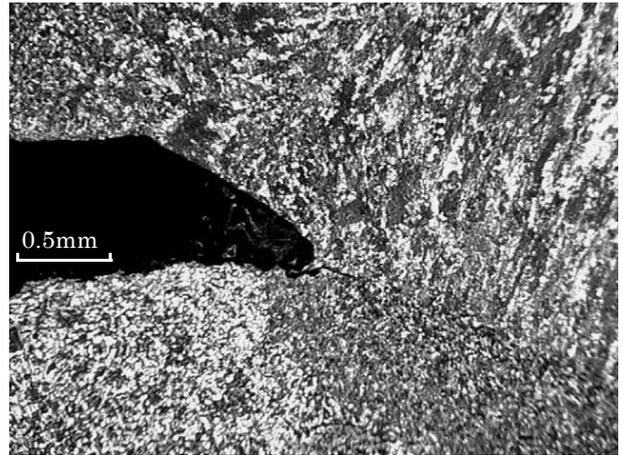


(b) ×100 倍

写真 4-4-10 3-E3 (第一ビード側, 始端側から 290mm 位置, 溶接線長 500mm)

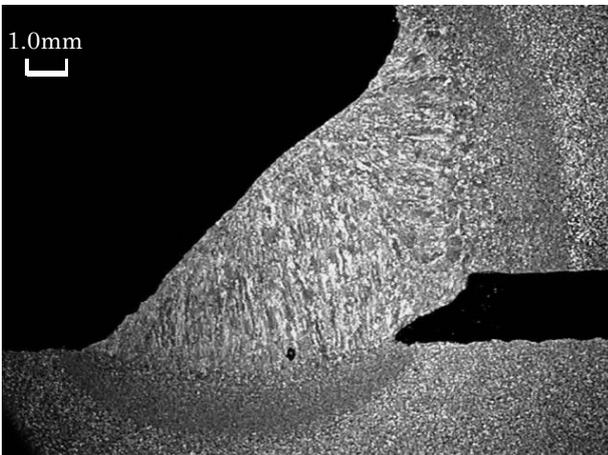


(a) ×25倍

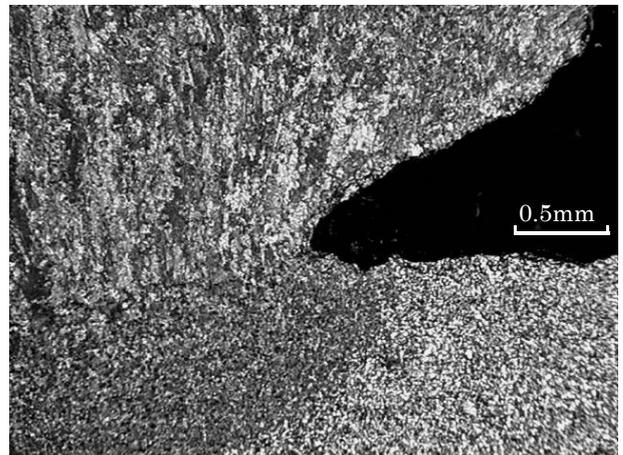


(b) ×100倍

写真 4-4-11 3-E3 (第一ビード側, 始端側から 370mm 位置, 溶接線長 500mm)

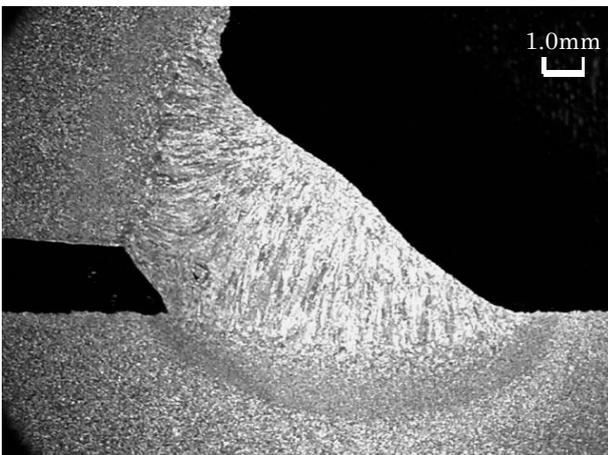


(a) ×25倍

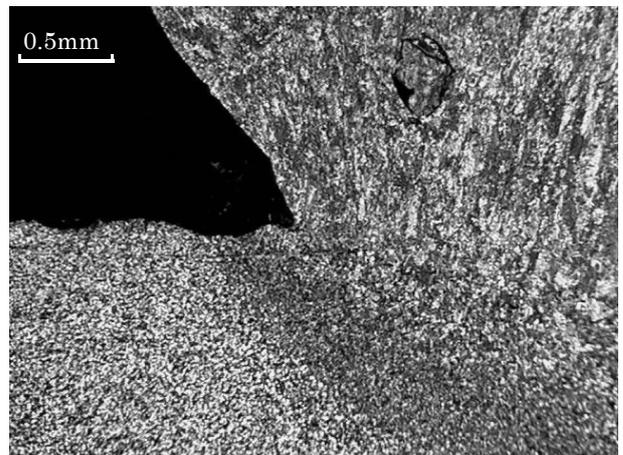


(b) ×100倍

写真 4-4-12 7-S3 (第一ビード側, 始端側から 450mm 位置, 溶接線長 500mm)



(a) ×25倍



(b) ×100倍

写真 4-4-13 8-S4 (第二ビード側, 始端側から 450mm 位置, 溶接線長 500mm)

4-4-3. 考察

本実験での結果の一覧を表 4-4-2 に示す。通し番号 27 番以降は、同様のすみ肉溶接試験を実施した文献 3, 4) の結果であり、これらをあわせて考察する。

(1) 炭素当量の影響

本実験で割れが確認されたのは、13-W1, 16-W2, 17-W3 の 3 体であり、すべて同じ鋼材 (500 材 : SMA490CW) である。この鋼材 4-4-1 で述べたように CEN や C_{eq} で整理するといずれも本実験の材料の中では最も高かった材料であるが、 P_{CM} は相対的に高くないものである。そこで、まず、鋼材の炭素当量の影響を確認するために、 C_{eq} -CEN 関係、 P_{CM} -CEN 関係、 P_N -CEN 関係を求め、これを図 4-4-1 に示す。図中のプロットは、溶接材料の強度 (引張強さの規格値が 430N/mm² 級, 490N/mm² 級, 570N/mm² 級) と、参考文献 3), 4) のデータを区分してまとめた。

(a) の C_{eq} -CEN 関係では、割れが生じた中実プロットは右上の領域に位置しており、CEN が高い場合、又は C_{eq} が高い場合は、溶接割れが生じる危険があると言える。(b) の P_{CM} -CEN 関係では、 P_{CM} が 0.266 の旧江ヶ崎跨線橋撤去部材が割れなかったため、縦軸の相関がよくない。同様に、(c) の P_N -CEN 関係においても、縦軸の相関がよくない。本実験では割れが生じた結果が少ないながら、鋼材の炭素当量を評価するパラメータとしては C_{eq} と CEN の相関が良く、合金元素の添加量が異なる鋼材の評価を行っていることから CEN での評価が適切と考えられる。言い換えると、現在の鋼材と合金元素の添加量が異なる場合は、低温割れ感受性組成として P_{CM} を用いて評価することは適切ではない場合もあると言える。

(2) 拡散性水素量の影響

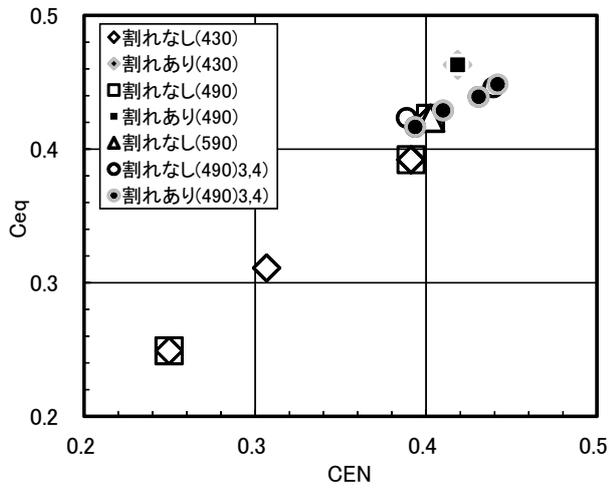
2-2-3 で述べたように、低温割れに影響を及ぼす因子の一つに拡散性水素量がある。(1) で示したように、炭素当量のパラメータとしては CEN が適切と考えられるため、拡散性水素量と CEN の関係について整理し、これを図 4-4-2 に示す。本実験では水素量の多いイルミナイト系溶接棒で割れずに、水素量の少ない低水素系溶接棒で割れが生じた。したがって、(a) では有意な傾向が見られないが、低水素系溶接棒のデータに限ると、(b) に示すように図中の右上の領域で割れが生じ、左下の領域では割れない傾向があるようにも見受けられる。イルミナイト系溶接棒の拡散性水素量が相対的に高いことは知られているが、割れが生じなかった原因については、さらなる調査が必要と考えられる。

(3) 拘束度の影響

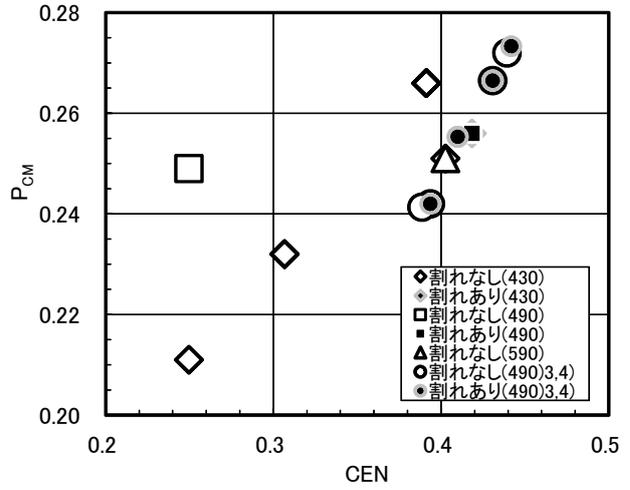
4-2 に示した、FEM で求めた拘束度を用いて実験結果を整理し、これを図 4-4-3 に示す。試験体形状がタイプ 2 のものは拘束度が高いが、旧江ヶ崎跨線橋の試験ケース (拘束度 : 1,726N/mm²・mm) で割れが生じていないため、有意な傾向が見いだしにくいものとなった。本実験で実施したすみ肉溶接割れ試験では、拘束の高さよりも立板の適度な縦曲がり変形が影響するとも考えられ、拘束度との相関は小さいとも考えられる。

表 4-4-2 実験結果一覽

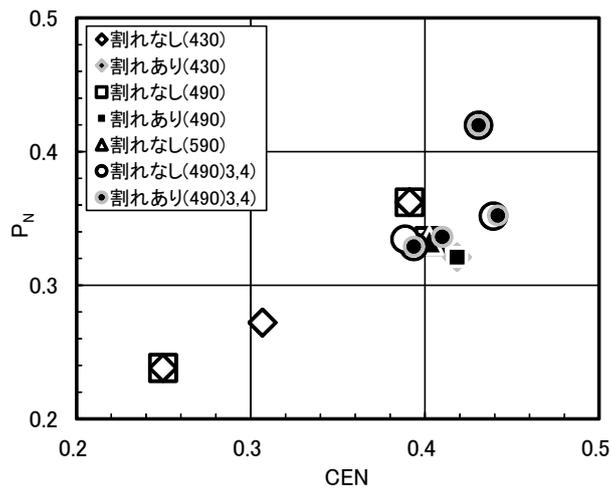
試験 ケース	通し 番号	試験 工程	供 試 鋼 材				継 手 の 拘 束 度				拡 散 性 水 素				割 れ		
			P_{CM}	P_N	CEN	橋梁名	製作年	底 板	立 板	試験体形状	第一B	FEM	JIS規格	溶 接 材		溶接環境	水素量
						板厚 (mm)	強度 (N/mm^2)	ギャップ (mm)	溶接長 (mm)	入熱量 (kJ/mm)	組立 溶接	拘束度 (N/mm)	被覆材	乾燥 状態	温度 ($^{\circ}C$)	湿度 (%)	ml/100g
1-E1	1							1.45	500	1.4				乾燥	35	80	42
2-E2	2		0.266	0.392	0.362	31	400	1.15	500	1.3		416.5		吸湿	5	75	43
3-E3	3						相当	0.72	500	1.3				乾燥			36
3-E4	4							0.95	500	1.4				乾燥			41
5-S1	5	1						0.83	500	1.5	あり		イルミナイト系	乾燥	35	80	42
6-S2	6		0.232	0.311	0.272	10	400	0.97	500	1.4		87.4		吸湿			43
7-S3	7						相当	0.93	500	1.3				乾燥	5	75	36
8-S4	8							1.15	500	1.3				吸湿			41
9-T1	9		0.211	0.249	0.238	40	400	0.95	500	1.4		668.2		吸湿	35	80	43
10-T2	10						相当	0.75	500	1.4				吸湿	5	75	41
11-E6	11		0.266	0.392	0.362	31	400	0.97	250	2.0		1726.4	イルミナイト系	吸湿	21	79	(43)
12-E7	12	2	0.256	0.463	0.321	27	490	1.14	250	1.7	なし	1582.4					
13-W1	13							1.00	250	1.5							
14-T3	14		0.211	0.249	0.238	40	400	1.00	250	2.5		1699.6					
15-T4	15						相当	1.58	250	2.4	なし	1582.4					
16-W2	16	3	0.256	0.463	0.321	27	490	1.20	250	2.3							(7.5)
17-W3	17							1.10	250	2.6							
18-E8	18							0.67	500	1.3		416.5	イルミナイト系	乾燥			(43)
19-E9	19		0.266	0.392	0.362	31	400	0.63	500	1.5		416.5	低水素系				7.5
20-E10	20						相当	0.80	500	1.6			低水素系				4.3
21-K1	21							0.80	500	1.4			イルミナイト系	吸湿			(43)
22-K2	22							0.87	500	1.9			低水素系				
23-K3	23	4	0.251	0.423	0.333	34	490Y	0.70	500	2.0	なし	465.4	低水素系		35	80	7.5
24-K4	24							1.15	500	1.9			低水素系				4.3
25-K5	25							0.89	500	2.0			低水素系	乾燥			6.4
26-S5	26		0.232	0.311	0.272	10	400相当	1.15	500	1.4		87.4	イルミナイト系	吸湿			6.7
E6HN	27		0.242	0.417	0.329	50	490	1	500	1.4			(W2)	490相当			(43)
E6SN	28						相当	1	500	1.4			(W3)	490相当			11
F6N	29		0.272	0.446	0.352	50	490相当	1	500	1.3			(W1)	490相当			15
G6N	30	—					相当	1	500	1.3	なし	810.6	(W1)	490相当	20	60	5
G6SN	31		0.267	0.439	0.420	50	490	1	500	1.4			(W3)	490相当			5
G6HN	32						相当	1	500	1.4			(W2)	490相当			15
H6H-F	33		0.241	0.423	0.334	50	490相当	1	500	1.4			(H)	490相当			11
I6M-F	34							1	500	1.4			(M)	490相当			15
I6N-F	35	—	0.255	0.429	0.336	50	490	1	500	1.4	なし	810.6	(N)	490相当	20	60	11
I6H-F	36						相当	1	500	1.4			(H)	490相当			12
J6N-F	37		0.273	0.448	0.352	50	490相当	1	500	1.4			(N)	490相当			15



(a) Ceq—CEN 関係

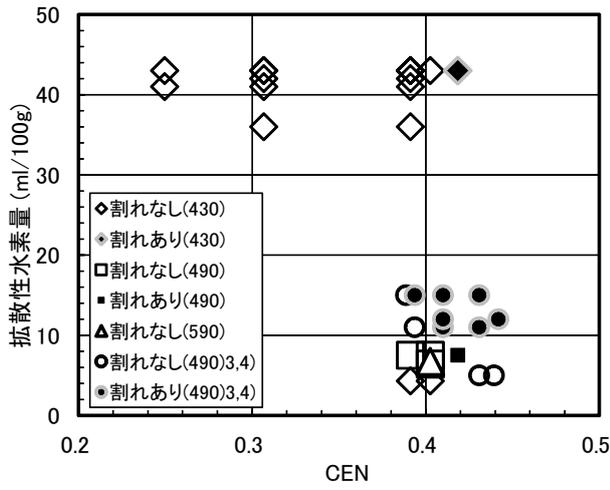


(b) P_{CM}—CEN 関係

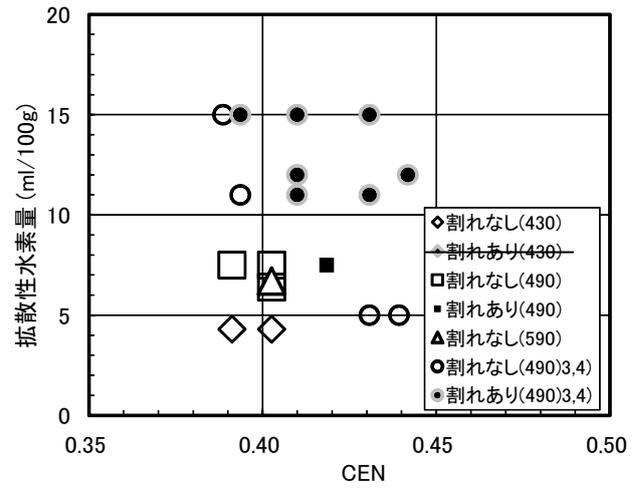


(c) P_N—CEN 関係

図 4-4-1 炭素当量の影響

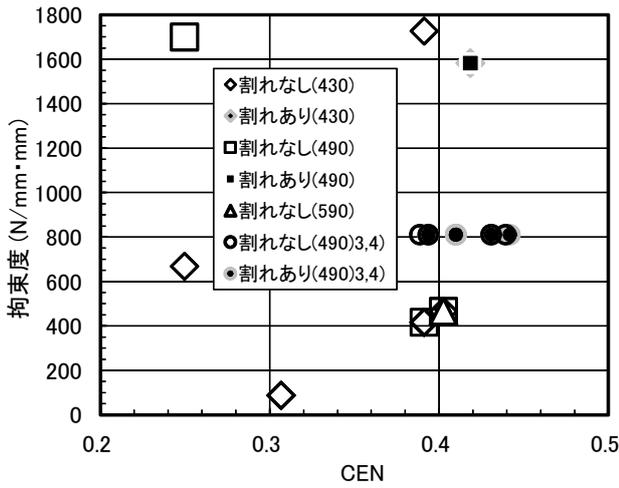


(a) 全データ

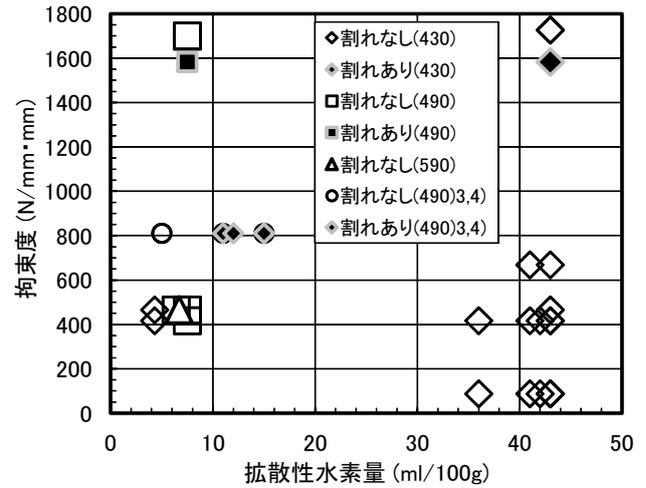


(b) 低水素系溶接棒抜粋

図 4-4-2 拡散性水素量—CEN 関係



(a) 拘束度—CEN 関係



(b) 拘束度—拡散性水素量関係

図 4-4-3 拘束度に対する影響

参考文献

- 1) 日本海事協会：鋼船規則検査要領，M編 溶接，M4.3 すみ肉溶接試験，pp.9-10，2009.4.
- 2) 田中甚吉，北田豊文：初層すみ肉溶接の変形割れ挙動とその割れ防止施工条件の選定，溶接学会誌，第49巻 第1号，pp.45-52，1980.
- 3) 南邦明，糟谷正，三木千壽：道路橋示方書におけるすみ肉溶接サイズの基準の考察，溶接学会論文集，第23巻 第2号，pp.422-430，2005.8
- 4) 南邦明，糟谷正，三木千壽：鋼橋製作におけるすみ肉溶接予熱条件の考察，溶接学会論文集，第25巻 第1号，pp.10-17，2007.
- 5) 田中甚吉，北田豊文：すみ肉溶接割れに関する研究，溶接学会誌，第41巻 第8号，pp.55-64，1972.
- 6) 南邦明，糟谷正，三木千壽：すみ肉溶接サイズの規定に関する考察（その1），土木学会第58回年次学術講演会講演集，I-151，pp.301-302，2003.9.
- 7) 木原博，稲垣道夫，堀川一男，栗山良員：50kg/mm²級高張力鋼すみ肉溶接部の割れについて，溶接学会誌，第39巻 第3号，pp.50-60，1970.
- 8) 明石重雄，夏目光尋：溶接割れと継手の拘束度について，横河橋梁技報，No.2，pp.39-46，1972.
- 9) 佐藤邦彦：鋼構造物の局部予熱と溶接割れの防止，溶接学会誌，第40巻 第11号，pp.82-95，1971.
- 10) 井藤昭夫，渡辺昇：すみ肉溶接継手の拘束度に関する実験的研究，溶接学会論文集，第6巻 第3号，pp.18-23，1988.