

# サーモグラフィー法を利用した鉄筋のガス圧接継手の品質検査

中央工学校 ○金光寿一 日大生産工 柳内睦人  
日大生産工(院)江藤 亮

## 1. はじめに

阪神淡路大震災では、耐震性能の低下に大きな影響を及ぼすことになる鉄筋・鉄骨の不良継手箇所の存在が明らかになった。我が国では、経済性や信頼性及び能率面からガス圧接法が広く採用され、施工実績では重ね継手を除く継手量の約90%程度を占めている。そのガス圧接部の検査では、外観検査は全数検査で、超音波探傷検査は抜取検査となっている。しかし、信頼性の高い超音波探傷試験は、割れや融合不良が比較的良好に検出できるものの、超音波を反射しない不良圧接面やブローホール及びスラブ巻込み等は検出率が低くなることが指摘されている。特に、手動圧接継手の不良は鉄筋品質よりも圧接施工条件、オペレータが行う加熱初期の還元炎の強弱など温度管理が大きく影響することになる。

そこで、本研究では、ガス圧接時の高温環境下における温度測定に非破壊検査手法の一つであるサーモグラフィー法を鉄筋のガス圧接継手の品質検査に適用を試みるものである。その適用に当たっては、現場作業での品質検査はもとより、講習会などで熱画像から得られる時系列な温度変化とふくらみ部の成長を事前に理解することによって作業者の技量の向上や判断力が養えるものと考えられる。

## 2. 実験概要

測定の対象とした鉄筋は、種類SD345のD25及びD32で同径同士の圧接とした。ガス圧接の条件は、温度管理を重視するために還元炎及び中性炎の時間を変えて行い、加圧量については規定の30Mpa以上となるようにD25は14.7kN及びD32は24.0kN以上とした。赤外線カメラでの温度測定は、ガス圧接時の鉄筋温度が高温域であるために、この温度領域に対応した高温専用フィルター（測定温度範囲：400～2,000℃）を装着している。なお、実験は平成17年7月23日に行い、天候は晴れ時々曇りで平均風速は1.1m/secであった。写真-1に実験

状況を示す。

## 2.1 圧接継手の実験条件とガス圧接装置

表-1に実施したガス圧接継手の諸条件を示す。No.1試験片は、鉄筋の端面を研削後、規定に準拠し突合わせた鉄筋の圧接端面の隙間を3mm以下になるよう指示器にセットし、19.9kNにて加圧しながら圧接同士が密着するまでアセチレンガスのみである還元炎で58秒間加熱し、その後、中性炎である酸素・アセチレンガス炎を16秒間加熱して加圧力を下げたも



写真-1 実験状況

表-1 実験条件

試験片 No.	呼び名と 組合せ	加熱条件(sec)		合計時間 (sec)	加圧量 (kN)
		還元炎	中性炎		
1	D25 + D25	58	16	74	19.9
2		40	5	45	19.9
3		34	0	34	19.9
4		42	33	75	19.9
5		37	0	37	19.9
6		25	0	25	25.2
7		41	39	80	15.2
8		39	10	49	15.2
9		32	0	32	15.2
10	D32 + D32	52	55	107	31.1
11		54	25	79	31.1
12		65	0	65	31.1
13		59	59	118	37.5
14		53	10	63	37.5
15		49	3	52	37.5
16		54	46	100	25.2
17		58	5	63	25.2
18		57	0	57	25.2

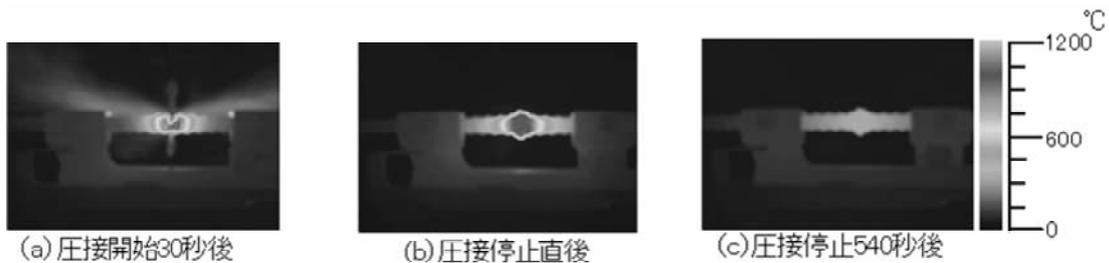


写真-2 熱画像 (No. 1試験片 : D25)

のである。ガス圧接装置は、電動油圧ポンプ(型式:HG-R4,最高圧力:700kgf/cm<sup>2</sup>)、ラムシリンダー(型式:TS-R)、圧接器(型式:32-S,施工範囲:D19~D32)、吹管(型式:B-1,ガス放出量:3,750l/h)、リングバーナー(型式:D25,火口数:8口,型式:D32,火口数:12口)で構成され、ガス圧接作業は、オペレータが手動で行うものである。

## 2.2 赤外線カメラによる圧接温度の測定

赤外線カメラ〔次元非冷却マイクロボロメータ型,波長領域8.0~14.0μm,測定温度範囲-20~300℃,感度0.08℃(at30℃)〕による温度測定は、鉄筋と赤外線カメラとの距離を85cmに保持して行った。特に、赤外線カメラにはガス圧接時の温度が1,000℃以上と高温域になるために、この温度領域に対応した高温専用フィルターを装着している。

## 3. 実験結果

### 3.1 赤外線カメラで得られた熱画像

写真-2(a)~(c)はガス圧接時に得られた熱画像である。ガス圧接開始30秒後の熱画像では、赤外線カメラへの高温専用フィルターの装着によってリングバーナーで加熱されている状況を視覚的に確認することができる。なお、No.1の圧接部の温度は、30秒後で835℃、加熱停止直後で1,004℃であった。

一方、写真-3は還元炎時と中性炎時の熱画像を比較したものである。アセチレンガスの多い炎を還元炎というが、酸素が加わった中性炎と比較すると、火炎の変化が明瞭に確認できる。アセチレンガス(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)が燃焼すると、水と二酸化炭素が生成する。赤外線は透過力が強いが、炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)や水蒸気(H<sub>2</sub>O)のような極性を持った気体には吸収され放射エネルギーを捉えることができる。圧接作業で大切なことは、圧接面の隙間が完全に閉じるまでは還元炎で加熱することであり、熱画像から幅焼きの時期も同時に確認することができる。

### 3.2 加熱条件と品質評価

表-2は実験の結果一覧である。表中の圧接部の温度は加熱停止直後と1分経過後の温度を

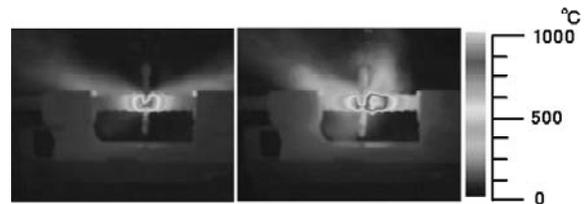


写真-3 還元炎と中性炎の相違

示している。ふくらみ部の長さ及び直径は、S.Y.ゲージを用いてそれぞれ直交した方向で測定した平均値である。不良品を判別する基準値は、長さでは直径の1.1倍以上でD25が27.5mm以上、D32が35.2mm以上で、直径は1.4倍以上とされておりD25が35.0mm以上、D32が44.8mm以上である。超音波探傷試験の判定はD25が54dB以上をD32が56dB以上を不合格としている。また、表中には熱画像から読取った加熱停止直後のふくらみ部の直径を示している。

#### (1) ふくらみ長さ及び直径との関係

ふくらみ部の長さ及び直径の可否は、表-2に示すとおり合格となったのは、D25はNo.1、No.4、No.7でD32ではNo.10、No.13、No.16と片方のみの合格はない。図-1(a),(b)は、その加熱停止直後の溶接温度と実測したふくらみ部の長さ及び直径の関係である。規定される長さは直径の1.1倍以上であるが、D25及びD32ともに還元炎のみは規定値以下であり、規定を満足するためには加熱停止直後の圧接部温度は1,000℃以上が必要であることが分かる。しかし、No.8とNo.11は1,000℃以上にも拘わらず規定値以下となっており、規定値を満足するためにはD25では還元炎と中性炎の加熱時間がNo.1の74秒程度、D32ではNo.16の100秒程度が目安になる。また、ふくらみ部の直径規定は母材の1.4倍以上であるが、長さと同条件の加熱が必要である。その規定を満足する還元炎と中性炎の関係は、還元炎のみで得られた上昇温度を回帰して推定した。図-2に還元炎のみで得られた加熱停止直後のふくらみ部の温度を示す。D25のNo.8(還元炎39秒,中性炎10秒で不合格)の還元炎の例では還元炎で940℃程度まで上昇しており、その後規定を満足するには25秒間程度の中性炎加が必要となる。

表-2 実験結果一覧

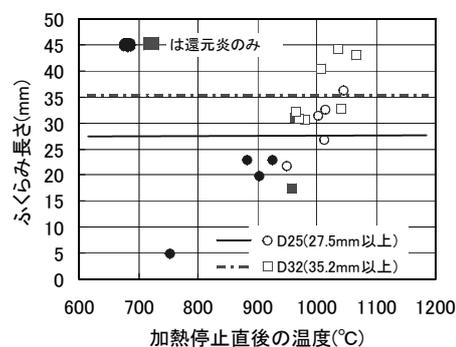
試験片 No.	画像温度(°C)		ふくらみ部(mm)		強度試験(N/mm <sup>2</sup> )			画像からの 直径 (mm)	超音波 判定
	0分後	1分後	長さ	直径	降伏	引張強度	伸び(%)		
1	1004	726	31.27	40.52	369	549	16	40	合格
2	950	632	21.53	32.32	435	627	17	35	合格
3	884	589	22.77	30.37	373	528	8(破断)	30	合格
4	1015	725	32.41	47.62	367	546	13	48	合格
5	926	625	22.76	34.08	367	547	15	35	合格
6	754	424	4.87	26.83	-	290	2(破断)	25	不合格
7	1047	775	36.17	44.49	374	553	21	48	合格
8	1014	662	26.67	31.79	369	546	12	33	合格
9	904	581	19.62	28.83	371	491	7(破断)	30	合格
10	1069	822	42.79	54.01	379	556	13	53	合格
11	1043	733	32.66	43.18	375	558	16	43	合格
12	964	717	30.96	42.22	371	494	5(破断)	45	合格
13	1038	817	43.99	56.37	373	554	14	53	合格
14	982	690	30.54	43.27	378	557	18	40	合格
15	971	660	30.70	41.34	375	554	19	43	合格
16	1008	793	40.32	51.99	374	561	12	56	合格
17	965	687	32.00	39.12	372	557	18	43	合格
18	959	633	17.39	34.17	376	485	5(破断)	37	合格
判定基準	D25	27.5以上	35以上	345~440	490以上	18以上	35以上	54dB	
	D32	35.2以上	44.8以上						20以上

(※ 表中の網掛けは不良品を示す)

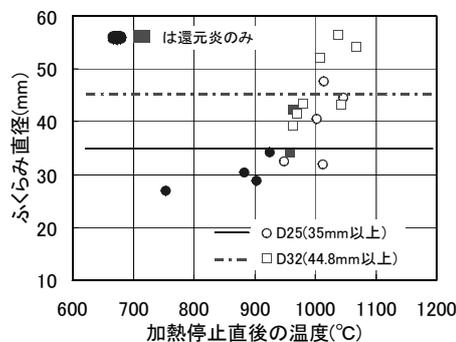
また、D32のNo. 11(還元炎54秒, 中性炎24秒)では960°C程度まで上昇し、その後35秒間程度の中性炎加熱が必要となる。サーモグラフィ法は、このような時系列な温度管理において最適な検査手法であり、加圧力を低下する前にふくらみ部の温度や状態の評価が可能である。

(2) 加熱条件と引張強度との関係

引張試験において降伏強度及び引張強度の基準値を満足できなかった試験片はNo. 6のみである。圧接の条件は、還元炎のみを25秒間加熱したもので、加熱停止直後の温度は754°Cとなっており、ふくらみ部の大きさもほとんど母材と同じである。しかし、引張強度は基準値を満足しているものの、圧接部から破断した試験片がみられる。破断した試験片は、全て還元炎のみのもので、No. 2の中性炎を5秒間、No. 15の3秒間、No. 17の5秒間の僅かな加熱においては破断までに至っていない。図-3に加熱停止直後の温度と伸び率の関係を示す。その値は上昇温度が900°Cと1,000°Cにおいてほぼ同等であり、破断した試験片以外の伸び率については中性炎加熱時間の影響は小さいことが分かる。No. 2では中性炎加熱が僅か5秒間であるが、ふくらみ部の大きさは基準値を満足していないものの、伸び率は17%とふく



(a) ふくらみ長さ



(b) ふくらみ直径

図-1 圧接温度とふくらみ部の評価

らみを満足した試験片と比較しても同等以上の値となっている。

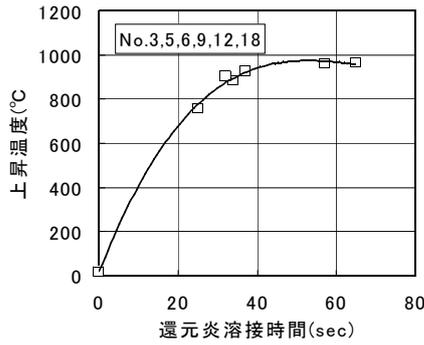


図-2 還元炎のみでの上昇温度

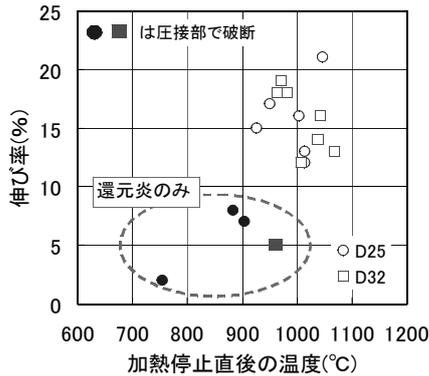


図-3 伸びと上昇温度の関係

(3) 超音波探傷試験と引張試験との関係

超音波探傷試験の判定は、D25のNo. 6試験片のみが54dB以上となり不合格となった。この試験片は、表-2に示すように降伏強度以下で圧接部から破断したもので、加熱は還元炎のみで25秒間加熱し、その上昇温度は754°Cである。圧接部からの破断は、No. 3、No. 6、No. 9、No. 12、No. 18の5試験片であるが、超音波探傷試験ではNo. 6を除いてはいずれも合格となっている。これらの試験片のうち引張強度が基準値である490N/mm<sup>2</sup>以下となったのがNo. 18試験片で、基準値とほぼ同等なのがNo. 9とNo. 12試験片である。これらに共通した溶接条件は、還元炎のみの加熱であり、還元炎のみで加熱時間を長くしても品質への効果は得られない。

(4) 実測直径と熱画像直径との関係

写真-4は、熱画像からNo. 1試験片の直径を求めるために切断線(1, 2, 3)を設けたものである。図-4には、その切断位置の温度変化を示す。ふくらみ部の直径の算出は、先ず母材切断線2から変化点画素位置(84と116：画素数32)を読み取り、母材直径(D25)との関係から1画素寸法を求め、次に切断線1の変化点(73と124：画素数51)の画素数から1画素寸法を乗じて算出した。従って、切断線2の画素数32からD25の1画素寸法は0.78mmとなり、ふくらみ部の画素数51から直径は39.8mm(表中では40.0mm

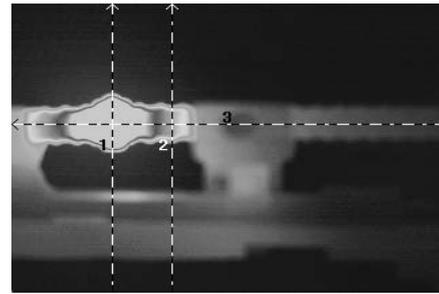


写真-4 熱画像と切断線

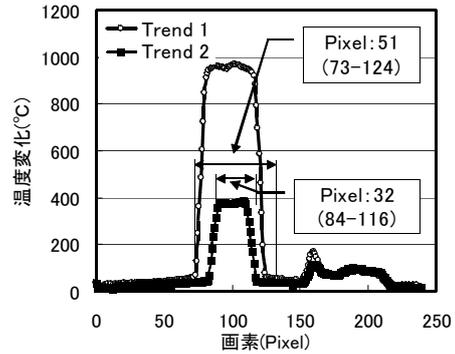


図-4 切断線位置の温度変化

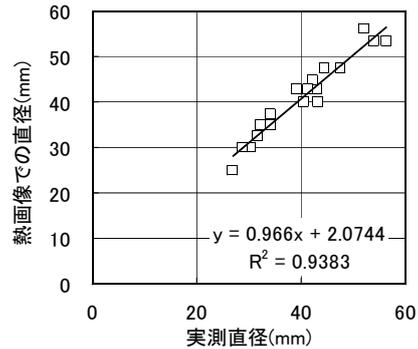


図-5 熱画像の直径と実測値との比較

としている)となる。図-5は、S. Y. ゲージで実測したふくらみ部の直径と加熱停止直後の熱画像から求めた直径とを比較したものである(表-2 参照)。両者は良好な比例関係にあり、サーモグラフィ法がガス圧接継手の品質検査に利用できることが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた所見を以下に示す。

- (1) 圧接温度及び圧接時間は、呼び名によって適切な還元炎及び中性炎加熱が存在し、圧接部分のふくらみ不足、接合不良などが発生することが明らかになった。
- (2) 圧接条件では、加熱温度の方が加圧量よりもガス圧接継手の品質へ与える影響が大きいことが分かった。
- (3) 設計曲げ強度時の鉄筋の伸びを10%に仮定すると溶接温度は969.9°C、溶接時間は68秒以上必要となる。