

自動ガス圧接による鉄筋の接合に関する研究

STUDY ON JOINTING OF REINFORCING STEEL BARS BY AUTOMATIC
GAS PRESSURE WELDING

高野 重雄*・横川 孝男**・半 沢 貢***・岩瀬 喜八郎****

By Shigeo TAKANO, Takao YOKOKAWA, Mitsuqu HANZAWA
and Kihachiro IWASE

1. 緒 言

鉄筋の接合には各種の方法があるが、わが国においては、その簡易さと経済性が見地からガス圧接が広く用いられている。この方法は、鉄筋の接合端を酸素アセチレン炎で加熱し、高温において加圧接着させるもので、鋼材を溶融させることなく接合させるので、アーク溶接のように鉄筋母材の溶融に伴う問題もなく、優れた接合法である。

しかし、従来の圧接工法は手作業によっているため、継手性能が作業者の経験や能力、あるいはそのときの作業条件などによって大きく左右され、必ずしも常に適正な作業が行われず、したがって継手の信頼性に不安があることなどが欠点とされてきた。しかも、近年コンクリート構造物の大型化に伴い、鉄筋径も増大の傾向にあり、直径 51 mm (D 51) のような太径鉄筋が実用化されるに至っているが、鉄筋が太くなると、適用する圧接条件もいっそう厳しい制約を受け、上述の欠点が継手の品質管理上きわめて重要な問題となってくる。

この問題の対策として、従来から圧接工の技量検定試験と、施工した継手の抜き取り検査が行われているが、いずれも満足すべきものではなく、基本的な工法の改善と検査精度の向上が望まれていた。その方法として考えられることは、前者の工法に対しては、ガス圧接の自動化があり、後者の検査に対しては非破壊検査がある。

ガス圧接の自動化は圧接工程の機械化と自動制御により、圧接条件と工程を標準化し、継手の品質管理に有効な手段を提供するものであり、この意味において、継手の信頼性向上に大きな役割を果たすものである。

自動ガス圧接工法はすでに著者らの数年にわたる研究開発¹⁾の結果に基づき、昭和 51 年以来実際の施工に適用されているが、超音波による圧接継手の非破壊検査法の開発と相まって、漸次普及するものと期待される。

本報告は以上のような背景と目的のもとに実施された自動ガス圧接工法の開発研究に関する部分と、その後、本工法によって初めて可能になった応用研究に関する部分とからなっている。本学会誌にはすでに装置と施工例を中心として報告²⁾したが、日本圧接協会からもこの装置による自動圧接継手の広汎かつ詳細な確性試験報告³⁾が出されているので、本稿とともにあわせて参照していただければ幸いである。

2. ガス圧接の原理と方法

ガス圧接法には大別して 2 種類の方法がある。その 1 つは Open butt 法、他は Closed butt 法とよばれるものである。前者は加熱に際し、適当な間隔をとって接合面を溶融するまで加熱した後、隙間を閉じて加圧接着させるもので、融接の分野に近いものと考えられる。この方法は欧州においては用いられているようであるが、わが国では行われていない。後者の方法がわが国で一般に用いられているものであって、名の示すごとく、初めから接合面を接触させ、なるべく隙間のない状態で加熱加圧を行い、鉄筋接合面を溶融することなく接合させるものである。

本報告の方法も後者に属するもので、接合面に融体を介在しない固相接合である。

固相接合は非鉄金属の接合にも用いられており、これに関する研究報告も多く、接合の機構についても諸説⁴⁾があるが、接合に必要な第一の要件は、接合面の酸化膜その他、接合を妨げ強度を低下させる異物の生成、介在を防ぎ、清浄な金属面をできるだけ広く接触させることである。その後の結合を左右する因子として、拡散、

* 正会員 新日本製鐵(株)製品技術研究所・課長研究員

** 正会員 工博 日鉄商事(株)技術主幹(元・新日鐵製品技研)

*** 新日本製鐵(株)製品技術研究所・課長研究員

**** 浜中ナット(株)(元・新日鐵製品技研)

再結晶、結晶格子の整合、せん断変形 (shear displacement) 等が考えられているが、これらはいずれにしても接合部の加熱と加圧によって促進される。したがって当面積筋の圧接に必要な実際的な条件は、まず接合面の酸化をできるだけ少なくするとともに、加圧によって接合面の緊密な接触を図り、必要な高温に加熱しつつ、さらに接合部の膨らみによって接合面に十分な変形 (接触面積の拡大) を与えることである。これらの条件の中で、実用的な圧接工法として、重要で、しかも困難なものは接合面の酸化防止であり、鉄筋径が大きく、加熱時間の長いものほど難しい。

しかしこの対策として各種の方法^{5)~7)}が考案されており、現在実用化されている代表的なものは、燃料ガスであるアセチレンの不完全燃焼による分解によって、加熱雰囲気還元性もしくは非酸化性に保とうとするものである。

この方法にも2種類あって、1つは多口式バーナのすべての火口の焔をアセチレン過剰炎とするもので、他は加熱用火口とは別個に設置された専用火口から加熱雰囲気、もしくは鉄筋の隙間にアセチレンガスを噴射するもので、それぞれ一長一短があるが、本報告の方法は、装置の軽量化、作業性等を考慮して後者の方式を採用した。

また加圧の方法にも若干異なったものがあり、一定範囲の圧力を保持して徐々に継手の膨らみを形成していくもの (定圧法) と、鉄筋の隙間を密着させる1次加圧の時期と圧接部の膨らみを形成する3次加圧の時期に設定圧力を加えるもの (2段加圧法) とがあるが、本報告の方法は後者の2段加圧法に属するものである。

3. ガス圧接自動化の方法

鉄筋の圧接には一定の手順があり、これらは比較的簡単ないくつかの段階に分割して進行させることができる。

しかし、一方ではガス圧接が固相接合であるために、アーク溶接等の融接とは異なった条件を必要とする。すなわち、加熱温度、加圧力、変形量、加熱雰囲気等の影響が大きい。したがってこれらの条件を適当に管理しながら、工程の各段階を所定のプログラムに従って進行させるシーケンス制御を行うことによってガス圧接を自動化することができる。すなわち、入熱量に相当する加熱ガス (酸素、アセチレン) の流量を定め、加熱スケジュール (加熱幅と時間) を一定とすれば、継手部の温度とその分布はほぼ定まり、さらに加圧スケジュール (加圧の時期と圧縮量) を定めれば継手部の膨らみの形・大きさが定まり、所要の継手形状を得ることができるので、

圧接する鉄筋の径に応じて適当な条件とプログラムを設定すれば、これに従って自動的に繰り返し同一の工程を再現して精度のよい圧接を行うことができる。この工程プログラムを進行させる方法としては、工程の各段階に所定の時間を設定し、時間の経過に従って工程を進める方式が最も簡単であるが、加熱温度は現場環境において風などの影響を受けやすく、実用上問題がある。そこで、工程中加圧によって生ずる圧縮量 (アプセット) を検出して、これを制御の手段に利用することによって、工程時間を調節し、所定の圧縮量と継手形状を確保し、現場作業への適応性をもたせるようにした。

このような方式による圧接工程プログラムの一例を図-1に示す。工程の各ステップの時間は入熱量、加熱幅、バーナの能力等によって適正に定めなければならないが、これらの条件設定は、対象とする鉄筋の太さに応じて、それぞれ実験的に標準値を定め、現場の環境に応じて必要であれば、使用するガス量 (ガス圧) を若干調節する。装置作業方法等についてはすでに報告^{2), 6)}があるのでここでは省略するが、ただ現在の装置は適用範囲が

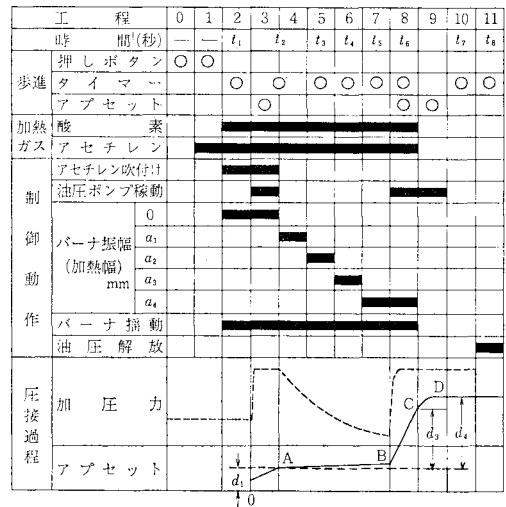


図-1 圧接工程プログラムの一例 (D 51)

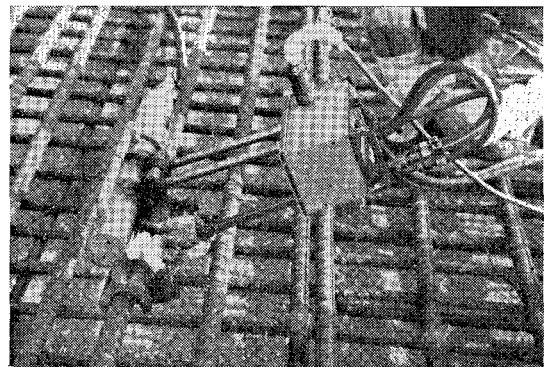


写真-1 自動ガス圧接機 (オートウェルパー)

D 51～D 25 まで拡大されるとともに、写真-1 のように小型になり、パーナ駆動機の重量は約 30% 軽減されたことを付記する。

4. 継手の品質と強度に及ぼす圧接条件の影響

ガス圧接を自動化して優れた継手を得るためには、自動化に必要な装置の開発はいうまでもないが、そのほかに施工現場の作業環境も考慮した適切な圧接条件が設定されなければならない。

このため著者らは、自動ガス圧接における鋼材の接合過程、加熱、加圧条件の影響、作業環境の影響などについて実験を行った。その結果は、一部報告⁹⁾したのものもあるが、ここでは、新しい実験結果を加え、主要な項目を選んでやや詳しく述べることにする。

(1) 加熱温度

加熱温度はガス圧接において最も重要な条件の一つであるが、継手部の温度は加熱時間、使用ガス量、加熱の幅、パーナの形式と寸法、鉄筋突合せ部の初期隙間、風の有無、鉄筋表面形状などによって影響を受け、また継手の部位によって異なる。

現場的な鉄筋のガス圧接においては、長時間に及ぶ加熱は許されないので、加熱温度はかなりの高温を用いることが必要である。この必要な温度は鋼材の成分によって異なるとも考えられるが、通常の材質の鉄筋継手において、実用的な継手強度についてみる限り、著しい差はないようである。

継手の温度分布、表面と内部温度、風の影響、継手姿勢の影響、隙間の影響などについての温度測定結果は、すでに日本圧接協会の確性試験報告書³⁾、その他⁹⁾に詳しい報告がある。これらの試験および、自動圧接の進行過程に関する実験結果によれば、実用的に必要な鉄筋の加熱温度は 1 250°C 以上と考えられ、自動ガス圧接の工程プログラム、加熱条件もこれに適合するように設定される。ただし、鉄筋の表面と中心部の間には D 51 の場合最大約 200°C、加熱終期でも 100°C 程度の温度差があるので、表面温度は 1 400°C 以上に達することもある。

風の影響は風を正面から受ける部分の表面温度の上昇

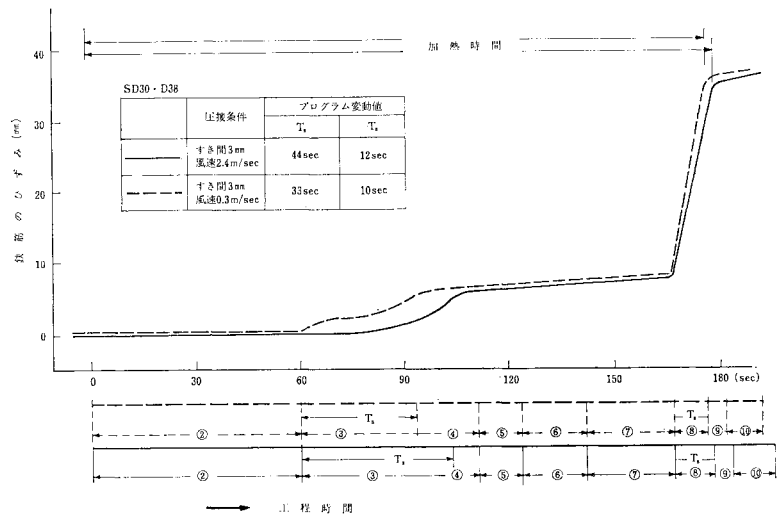


図-2 工程時間に対する風の影響

を遅らせるが、中心温度は風速 3 m/s 程度では実質的な影響は少ない。図-2 は風速 2.4 m/s のときと 0.3 m/s のときの圧接状況を継手部の圧縮量と加熱時間によって比較したものである。

いずれも同一のガス流量を用いており、また加圧力は一定であるから、一定の縮みを生ずるに要する加圧時間に差がみられる。加熱温度が低いときは加圧時間が長く、温度の高いときは加圧時間が短くなるので、これによって間接に加熱状態を知ることができる。すなわち、1 次加圧に要する時間 (T_1) をみると風速 3 m/s の風によって 11 秒延長されているが、3 次加圧に要する時間 (T_3) をみると 2 秒の差しかなく、全加熱時間も 2 秒長くなっているだけで、この加熱条件は 2.4 m/s の風に対してほとんど安定した加熱を行うことができることを示している。またこの実験において、1 次加圧 (T_1) は ③～④ 工程に設定された時間内で終わっているが、もし風がさらに強く、温度の上昇が遅れるときは T_1 が上記設定時間を超えることもある。このような場合には、設定時間にかかわらず ③ 工程は延長されて所定の縮みの生ずるまでこの工程は継続し、加熱時間もこれに伴って増加される機構になっている。しかし通常は T_1 が ③～④ 工程の設定時間内に納まるようなガス流量で加熱するのがよい。

風速が 5 m/s 程度になるとパーナのガス流量を増加するか、加熱設定時間を長くする必要があるが、通常の現場での使用を考慮すれば、ガス流量（酸素の使用圧力）を若干増加するのが便利である。

図-3 は風速 5 m/s の風が、鉄筋の加熱温度に与える影響と、パーナの酸素流量を若干増加することによって、これを補うことができることを示したものである。

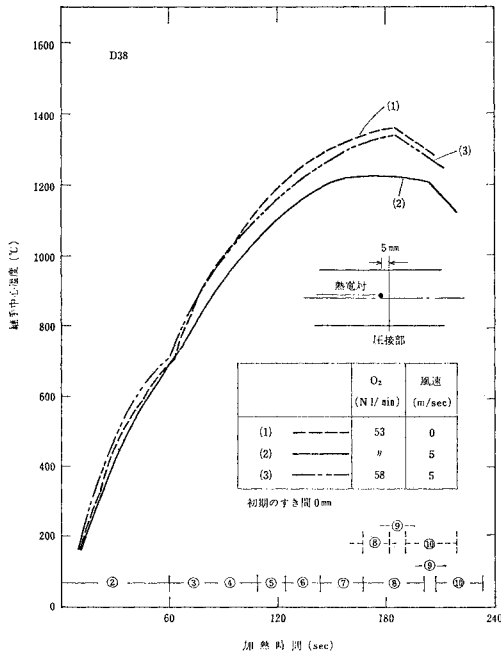


図-3 加熱温度に対する風の影響

温度は図に示したように継手の中心部に熱電対を挿入して測定した。この実験によれば、ガス量が同じであれば、5 m/s の風によって中心の最高温度は約 120°C 低下するが、酸素流量を（したがってアセチレン流量も）5 l/min 増加する（実際には装置の圧力計によって使用圧力を上げる）ことによって、風のない場合と同様な加熱温度が得られることがわかる。

(2) 加熱雰囲気

初期加熱雰囲気の状態は、接合面の隙間が密着するまでの間に、鉄筋の接合面が受ける酸化の程度に大きな影響を及ぼし、隙間の大きい場合には特に注意を要する問題である。自動圧接機オートウェルバーでは、この酸化を防止する手段として、加熱初期にアセチレンを専用火口から加熱雰囲気および鉄筋の隙間に噴射する方式をとっているため、この噴射量が酸化防止の効果に影響する。

写真-2 は D 51 鉄筋で、隙間を 5 m/m に保った継手部を 100 秒間加熱したとき、鉄筋端面に付着する炭素の状況を示したものである。(a) は噴射量が不足 (14 Nl/min) で、(b) は十分 (24 Nl/min) な場合である。このような 2 つの条件で実際に圧接を行い、継手の破面試験を行った結果が 写真-3 で、(a) は噴射量不足 (b) は噴射量が十分な場合である。すなわち噴射量が不足であれば破面試験においてフラット破面が多く、接合面に酸化物が残留して継手の品質を落とすことになる。この

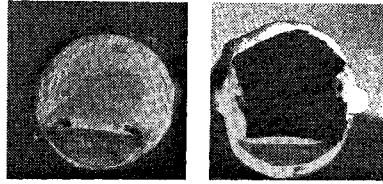


写真-2 アセチレン噴射による黒鉛付着状況

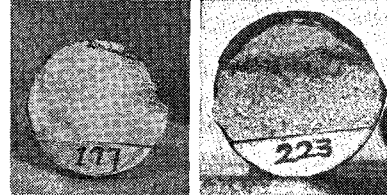


写真-3 アセチレン噴射量の影響

必要な噴射量は鉄筋サイズによって異なるので、自動圧接機にはガスの圧力計を設置し、ガス圧を調節することによってこの噴射量を定めている。

(3) 加圧および圧縮量

加圧および圧縮量の影響は接合の品質と継手の形状に現れる。継手の膨らみの大きさは、従来の経験によって、膨らみの直径を公称直径の 1.4 倍、すなわち断面積を 2 倍以上にすることが必要とされ、圧接協会その他の規準にも定められている。自動圧接においては鉄筋の太さに応じて一定の加熱幅を用いるので、膨らみの径はほとんど圧縮量によって定まる。したがって圧接プログラムには、直径が 1.4 倍以上で、かつ膨らみの形状がなだらかなような圧縮量が、鉄筋の太さに応じて設定される。しかし鉄筋の圧縮量は継手の寸法形状を整えるためだけでなく接合を完成し、加熱部の組織を改善するためにも重要な役割を果たす。すなわち加圧圧縮による接触面の拡大は、鉄筋相互の緊密な接触を図り、酸化物の分散、拡散の促進に寄与するものと考えられる。このほか、継手部は高温に加熱される結果として結晶粒が成長して組織が粗大化するが、圧縮による塑性変形は鋼の圧延、鍛造などと同様に、粗大化した結晶粒を細かくする効果をもつ。

このように加圧条件は加熱条件とともに継手の品質に重要な影響を与えるので、次に 1 つの実験例について述べる。実験に用いた鉄筋はデーコン 35 (SD 35)・D 38 である。

まず接合の進行状況を知るために、工程を各ステップの終りで中断して継手を冷却し、引張試験によって接合強度を調べ、次に最終加圧工程 (図-4, ⑧ 参照) における圧縮量によって継手の大きさを変え、同様に引張試験を行って変形率の影響を調べた。引張試験片は接合面で破断させるために平行部を短く仕上げた (直径 40

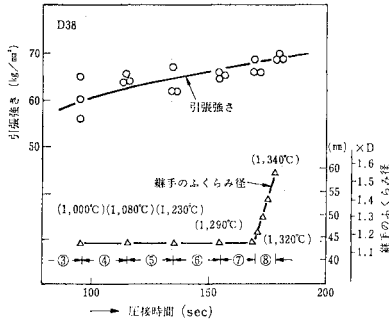


図-4 圧接工程における継手引張強さの推移

mm, 平行部 20 mm). このため引張強さは高くなるが, 素材強度はこの試験片で 67 kg/mm² である. 図-4 にプログラムの各ステップの終りで加熱を中断して冷却した試験継手の引張強さと, 膨らみの大きさ(直径)を示した.

図には加熱中断時の継手中心温度も示されている.

この結果によると, 継手の引張強さは1次加圧終了時に, すでに母材の 95% に達し, その後徐々に上昇するが, 継手の膨らみの大部分が形成される3次加圧による引張強さの上昇は大きくない. しかし, 引張破断面をみると3次加圧を行わない継手は, いわゆるフラット破面, またはそれに近い状況を呈しており, 接合部の材質がなお健全でないことがわかる. また, 最終加圧工程における圧縮量を変えた試験片の伸び, 絞り, 図には示されていないが, 圧縮量したがって膨らみの大きさの増加とともに引張強さよりも大きく改善される. これは上述のように熱間加工による継手品質の回復を示すものである.

5. 自動ガス圧接継手の性能と品質

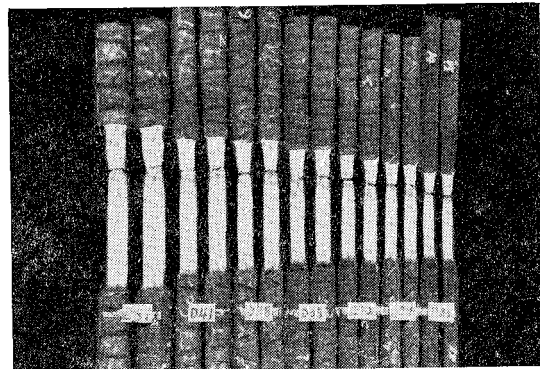
(1) 各種鉄筋継手の強度

自動圧接継手の各種試験結果は, D 51, D 38 について多くの実績があり, また報告もされているが, 現在の装置(オートウェルバー)は, D 25 まで適用することができるので, いままで報告されていないサイズの鉄筋を含めてまず通常の継手の試験例を紹介する.

写真-4 (a) は上記各サイズの鉄筋の自動圧接継手の外観で, 写真-4 (b) はこれらの継手を公称直径の 80% の径 (0.8 D) に切削して引張試験を行った試験片である. いずれも母材部分より破断しており, 圧接が十分行われていることがわかるが, これらの試験材は表-1 に示すように, 各種の表面形状, 材質, 銘柄のものを含んでおり, 通常の材質の鉄筋ならば自動



(a) 継手の外観



(b) 継手引張試験片

写真-4 各種鉄筋の継手外観と引張試験結果

表-1 試験材鉄筋の種類(写真-4)

よび名	種別	ふし形状	鋼種	銘柄
D 51	SD 35	斜	高炉材	デーコン
D 41	"	"	電炉材	メジャコン
D 38	"	"	高炉材	デーコン
D 35	SD 30	横	電炉材	OS
D 32	"	"	高炉材	NSC
D 29	"	クロス	電炉材	OH
D 25	SD 40	斜	高炉材	デーコン

機の適用に支障のないことを示すものである.

次にこれらの鉄筋継手試験の一例として電炉鋼鉄筋 D 32 について行った圧接試験の結果を示す. 写真-5 は SD 35・D 32 の継手を公称直径の 0.8 倍に切削して引張り, および曲げ試験を行ったもので, 引張試験値を

表-2 SD 35・D 32 自動圧接継手の 0.8 D 引張試験結果

No.	圧接時間 (s)	圧縮量 (mm)	継手直径 (mm) × D	引張試験片		降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
				直径 (mm)	標点間 (mm)			
1	143	25	46 (1.45)	25	200	39.7	62.1	17.1
2	"	26	"	"	"	39.1	62.5	18.1
3	"	27	47 (1.48)	"	"	40.5	62.9	17.3
4	"	26	"	"	"	39.7	62.8	16.5
5	"	27	"	"	"	39.6	62.1	17.5
母材				31.8	127.2	40	62	25

化学成分: 0.25 C, 0.19 Si, 1.06 Mn, 0.034 P, 0.030 S

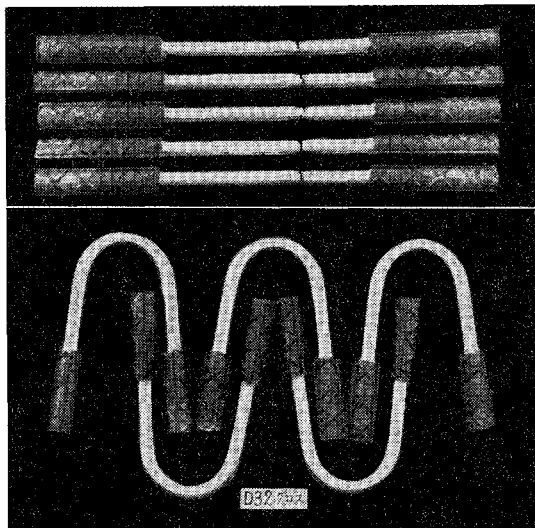


写真-5 SD 35・D 32 継手 0.8 D 試験片

継手の圧接条件 および 化学成分とともに 表-2 に示した。

継手の膨らみを削除した試験片は、膨らみによる接合部の補強効果を除いたものであるから、この試験片で所要の強度が得られれば、膨らみを削除しない実際の継手の強度は十分である。

(2) 種類の異なる鉄筋の自動圧接継手

前項で各種鉄筋の圧接継手の強度について述べた。これらは同種の鉄筋を接合する通常の継手である。しかし、ときには異種の鉄筋を接合する必要がある場合がある。異種の鉄筋には種別、表面形状、銘柄の異なるものも含まれるが通常の鉄筋であれば、これらの相違は圧接において実用上支障となるものではない。しかし、径の異なる鉄筋を継ぐ場合には相当の注意が必要であり、日本圧接協会の標準仕様書ではよび名の差が7を超える場合は原則として圧接を行わないことになっている。自動圧接を行う場合、現在の装置は接合面を中央にして、左右を均等に同一の幅を等しい時間加熱するようになっているので、接合面の両側において鉄筋の径が異なるときは加熱効果が異なるであろうと考えられる。しかし、一面において、圧接に適する加熱温度には許容範囲があり、また、同一バーナを用いる場合、鉄筋径の大小によって火口からの距離に差ができるため加熱効率も異なるという事情もあるので、実際に自動機を用いて異径継手を圧接し、強度試験によって継手の性能を確かめた。

使用した鉄筋は D 29 (SD 35, デーコン), D 32 (SD 30, 竹ふし), D 35 (SD 35, デーコン) で、継手は D 29-D 32, D 32-D 35 の 2 種類である。写真-6 はこれらの異径継手の引張試験片を示したもので、いずれも細い方

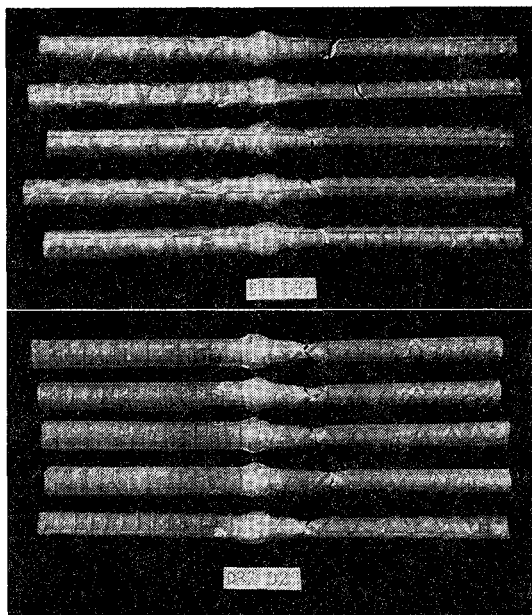


写真-6 径の異なる鉄筋の自動圧接継手の引張試験片

表-3 異径鉄筋継手の引張試験結果

継手の種類	鉄筋断面積 (mm ²)			降伏荷重 (kg)		最高荷重 (kg)
	D 29	D 32	D 35	I	II	
D 29-D 32 (SD 35) (SD 30)	642.4	794.2	—	24 400	25 000	35 700
D 32-D 35 (SD 30) (SD 35)	—	794.2	956.6	25 600	38 000	42 050

降伏点 (kg/mm ²)		継手降伏比(%)		引張強さ (kg/mm ²)
I	II	I	II	
(D 29) 38.0	(D 32) 31.5	68	70	(D 29) 55.6
(D 32) 32.2	(D 35) 39.7	61	90	(D 32) 52.9

の鉄筋母材部で破断している。表-3 はこれらの継手を圧接のまま(こぶ付き)で引張試験を行ったときの強度の一例である。ここで注目されるのは継手としての S-S 曲線 (荷重-伸び線図) には降伏点が 2 段に現れることで、表-3 においてはこれを I, II として示した。一方継手としての最高荷重は 1 つであるので、それに対する継手降伏比も 2 段になる。この試験に用いた鉄筋の種別は、SD 30 と SD 35 があり、継手において組合された鉄筋は、径、種別、銘柄、いずれも異なっている。したがってこれらの径と種別の組合せによって 2 個の降伏点あるいは降伏比の隔たりに大きな差が生じている。すなわち SD 35・D 29 と SD 30・D 32 の継手の降伏荷重および降伏比は 接近 しているが、SD 30・D 32 と SD 35・D 35 の継手ではかなり離れている。

次に異径鉄筋圧接継手の大きさは、日本圧接協会標準

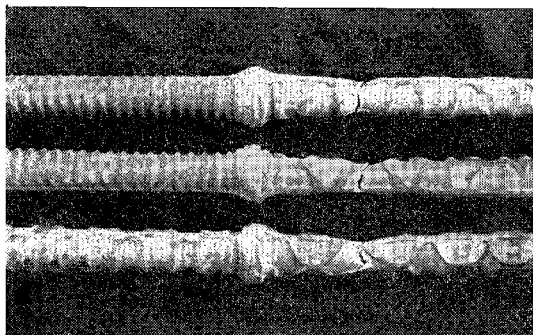
仕様書では細い方の鉄筋の1.4倍以上と定めている。自動圧接では圧縮量で膨らみの大きさを制御するが、この実験では太い方の鉄筋に合わせて縮み代を設定した。写真一6の各継手の大きさは、D 29-D 32の継手ではD 29に対して平均1.61 D, D 32に対しては平均1.46となり、D 32-D 35の継手ではD 32に対して平均1.56 D, D 35に対して平均1.42 Dとなつて上記の標準を満足しているが、概して太い方の鉄筋としては小さめ、細い方の鉄筋としては大きめの値になった。

以上の結果により、よび名の差が3または4であれば径の異なる鉄筋も自動機で支障なく圧接できることがわかった。しかし、よび名の差が6または7になる場合はさらに実験を行つてその可否を確かめる必要がある。

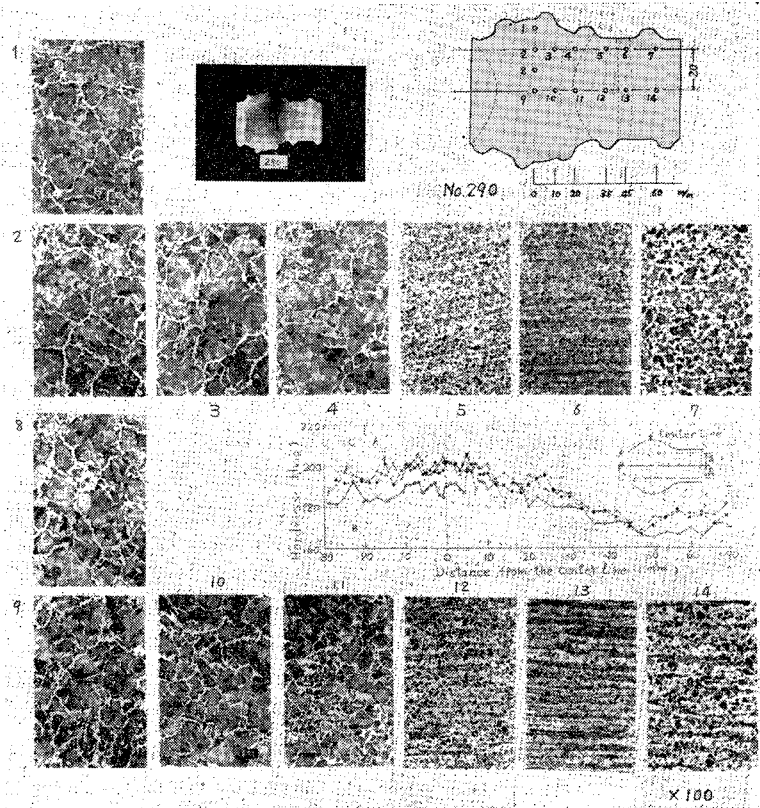
表面形状の異なる場合も、厳密に言えば加熱効率に差がないとはいえないが、実用的には両者に適した条件を用いればよく、特に支障はない。その一例として写真一7にD 51の3種の銘柄の鉄筋を用いて行つた試験の結果を示した。いずれも表面形状の異なる鉄筋の組合せであるが、引張試験において母材破断となっている。

(3) 自動圧接継手の内部組織と硬さ

写真一8に、一例としてSD 35・D 51(デーコン)の自動圧接継手の中心軸を含む断面における顕微鏡組織とヴィッカーズ硬さを示した。この写真にみられるように、最も高い温度に加熱された圧接面近傍は結晶粒が粗大化



写真一7 表面形状の異なる D 51 継手の引張試験片



写真一8 自動圧接継手の顕微鏡組織と硬さ

してフェライトの析出が少なく、したがって硬度も母材より高くなっている。しかし、圧接面より45~50 mm離れた部分では逆に母材より結晶粒が細かく、硬度も若干低くなっている。これは鋼の変態点直上に加熱されたことを示すものである。

また継手の表面に近い部分は中心部に比べて若干硬度が高くなっている。これも表面に近いほど加熱温度が高いのがおもな原因である。

一般に鋼は硬度の低い方が引張強さも低いが、圧接継手の引張試験における破断位置は上述の硬度の低下する位置とは通常一致せず、さらに圧接部より離れた部位で破断する。これは継手の膨らみの影響と考えられる。

(4) 自動圧接継手の超音波探傷特性

ガス圧接継手は各種の鉄筋継手の中で非破壊試験を適用できる唯一のものである。鋼板、形鋼などのアーク溶接継手の検査には以前から超音波探傷が適用されているが、異形鉄筋では表面に異形(ふし)があることと、圧接面の欠陥が超音波を反射しにくい形態を有していることなどのためにその適用が遅れていたが、近年の研究¹⁾の結果、圧接継手の引張強度の可否を判定することのできる超音波探傷法が開発された。その方法は斜角2探触

子反射法を用い、鉄筋のリップ表面において音波を送受信するもので、すでに日本圧接協会において、その探傷規程が設定され、また探傷技術者の技量資格制度が実施されるに至った。

鉄筋の自動ガス圧接継手については、圧接協会の確性試験において、全試験継手に超音波試験を適用した。試験結果については上記報告書に詳しいが、継手総数の約60%はまったく圧接面からの反射を認めず、反射のあったものも、その波高値は欠陥とは認め難い程度のもので、他の破壊試験の結果と一致するものであった。

また、実際の施工における自動圧接継手の超音波探傷検査も行っているが、一例として、ある橋梁工事の桁に使用された D 38 の圧接継手の探傷結果を次に示す。

表-4 D 38 現場圧接継手の超音波探傷検査成績

継手の種別		自動圧接	手動圧接
検査総数		208	87
個数		23	12
%		11.1	13.8
エコーのある継手			
(-dB)			
エコー高さ布(個)	大	2.5~4	1
	↑	4.5~6	2
		6.5~8	9
	↓	8.5~10	10
	小	10.5~12	1
エコー高さ平均(dB)		-7.8	-4.5

規程) によった。すなわち 表-4 のエコー高さの規程 0 dB (デシベル) は、圧接面からの反射エコーがこの高さを超えると、その圧接部は、規格引張強さを満足しなくなる限界に相当する。この規程によれば、ここで探傷を行った継手は、自動圧接によるものも、手動圧接によるものもすべて合格品であるが、両種の継手の検査結果を比較すると、自動圧接継手はエコー高さの平均値が低くなっている。

圧接継手における接合に起因する欠陥は、ほぼ一平面上に分布するという特徴があり、超音波探傷検査もこれを前提として、反射エコーを判定しているので、上記のエコー高さの差も、接合面の性状の差に由来するものと推察される。

以上自動ガス圧接工法の内容と作業条件の影響を検討し、この工法による継手の品質性能に関する試験結果によって、鉄筋の端面研磨、条件設定など所要の前処理および装置の取扱いを確実にすれば、自動装置の特性として、ばらつきの少ない安定した品質の継手を得ることができることを述べた。この特性は基本的にガス圧接継手の安全性を高めるものであるが、施工における継手の品質管理および検査の合理化にも役立つはずである。

すなわち、施工された継手の破壊検査を行うとすれば、必然的に抜取り検査となるが、品質のばらつきが小さければ、少数の試料によって精度のよい検査が可能になる。また、実際の鉄筋とは別個に圧接した試験継手によって圧接条件を確認して品質管理の手段とし、非破壊検査を併用することなどによって、継手を切取って行う従来の破壊検査に替えることも状況によって可能になるからである。

6. ガス圧接継手の疲労強度向上

前節までに自動圧接工法に関する基礎的な実験、研究の結果とその継手の品質性能について述べたが、次に工程の自動化によって可能になった本工法の応用に関する実験について述べる。

鉄道橋のように、設計荷重に近い大きな荷重の繰返しを受ける鉄筋コンクリート構造物に、ガス圧接した異形鉄筋を使用する場合は、引張鉄筋継手の耐疲労性が重要な問題となる。しかし、現状の異形鉄筋継手の疲労強度は、D 38 の場合、応力範囲で 13~15 kg/mm² といわれており、かなり低い値である。この疲労強度低下の原因については、従来ガス圧接部の膨らみと、膨らみ付け根部付近における異形鉄筋のふし、リップ等の突起によって、膨らみ付け根部分にノッチを生じ、そこに高い応力集中が起こって引張疲労強度の低下をきたすことが知られている¹¹⁾。これらの知見に基づいて、提案された実用新案もあるが、実用化されていない。また、圧接継手の疲労強度を改善する研究発表例はほとんど見当らない。この問題を解決するために考えられることは、継手の圧接部膨らみを小さくしてなだらかにし、継手形状を改善して応力集中を減少させる方法である。

前述のとおり、従来の技術では、継手の信頼性が低いという欠点のために、これを実現することは困難であった。しかし、本研究で開発した圧接工程の自動制御化により、継手の静的強度を確保して、かつ、膨らみ形状を自由にコントロールすることが可能となったため、本実験では、従来みられなかった疲労強度の大きい、ガス圧接継手が可能になることを提示するものである。本研究についてはすでに著者らによる報告^{12), 13)}があるが、ここでは自動圧接工法の応用例として概要を紹介する。

(1) 静的強度に及ぼす圧接部膨らみ径の影響

デーコン 35・D 38 の自動ガス圧接継手において、圧接部の膨らみ径を変えて、短ゲージ引張試験片および膨らみ付き試験材による接合強度を検討した結果、次のような結論が得られた。

a) 短ゲージ引張試験結果によると、加熱温度が十分

高い (1300°C 以上) ときは、引張強さは膨らみ径 1.2 D 程度で母材なみに達するが、伸び、絞り等の値からみれば、少なくとも 1.3 D 以上とする必要がある。

b) 膨らみ径 1.3 D, 1.4 D, 1.6 D の試験材につき引張り、曲げ、破面試験によって比較試験を行った結果、膨らみを削除すると、1.3 D, 1.4 D で圧接面破断を生ずることがあるが、引張強度は十分得られており、また実用的なこぶ付き試験片では、1.3 D の場合も引張試験、曲げ試験に合格した。したがって、突合せ面の隙間に注意し自動圧接機によって管理された圧接を行えば、従来一般に行われているより小さい 1.3 D の継手でも実用上支障のない強度が得られることがわかった。

以上の検討結果から、継手の信頼性向上以外に、対疲労性向上を目的とした自動ガス圧接継手について、従来実施工では行われていない、膨らみ径 1.3 D, 1.4 D の疲労試験を行う価値があると判断した。

(2) 疲労強度に及ぼす圧接部膨らみ形状の影響

a) 実験方法

供試材として、デーコン 35・D 38 (降伏点 42 kg/mm², 引張強さ 61 kg/mm²) を用いた。ガス圧接継手は、自動ガス圧接機で圧縮量制御により、圧接部膨らみ径を変えた。製作した継手は、膨らみ径が 1.3 D (S), 1.4 D (M) および 1.6 D (L) である。L は従来用いられている形状である。これら 3 種類の継手と素材 (B) について、50 t アムスラー型疲労試験機を用い、片振り引張疲労試験を実施した。試験条件は、試験機の都合で下限応力を 0.4~2.0 kg/mm², 繰返し速度を 500 と 600 cpm とした。実験結果を応力範囲 S_R で評価するため、この試験条件の差はほとんど影響しない。試験片の試験機への装着は、つかみ部破断を防止するため、スリーブなどを介して間接的につかむ方法を採用した。

b) 実験結果

素材と自動ガス圧接継手の片振り引張疲労試験結果を図-5 に、疲労破壊した試験片の例を、写真-9 に示す。一般に、疲労限は 2×10^6 回の疲労強度と近似しているので、 2×10^6 回における疲労強度で整理してみた。素材の場合は、試験片を間接的につかんでもつかみ部で破断しやうい。したがって、つかみ部で破断したときは、

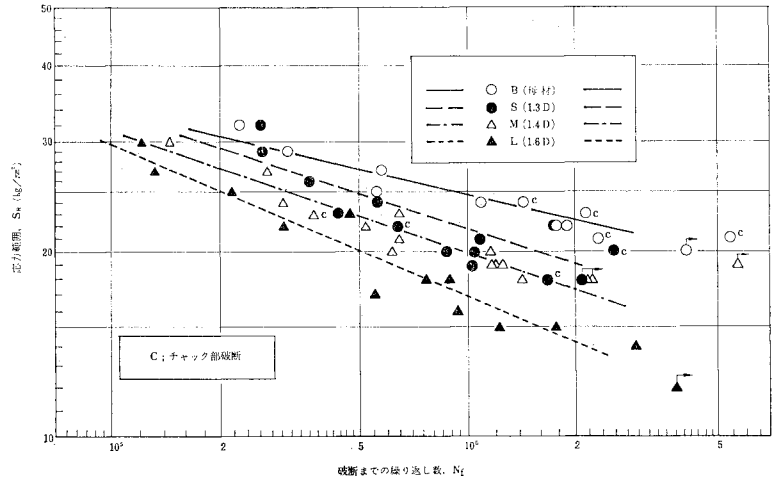


図-5 疲労試験結果の比較

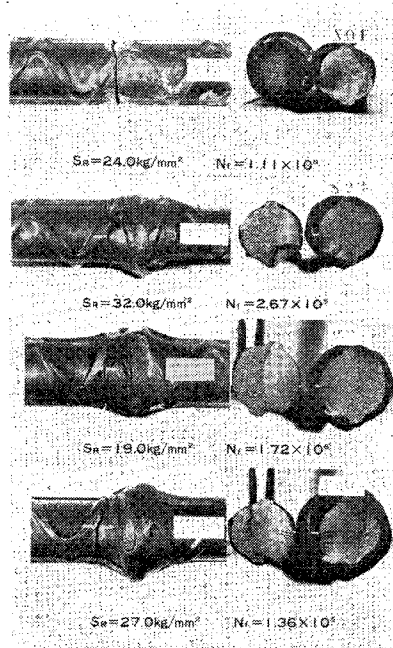


写真-9 母材と継手の疲労試験片

素材で破断するか、あるいは試験片が短くなって試験機に装着できなくなるまで、つかみ直しをすることにより疲労試験を続行した。破断した試験片について、最小自乗法で求めた $S-N$ 曲線より、 2×10^6 回における素材の疲労強度は S_R で 22.5 kg/mm² となったが、つかみ破断が 4 本あるため、真の値はこれより少し高いと考えられる。圧接部膨らみの小さい S (1.3 D) は疲労強度が高く、素材のようにつかみ部で破断するものが 4 本発生した。疲労破壊は、大部分が膨らみの中腹にある、ふしの圧接部側付け根で起きている。破断した試験片について、最小自乗法で求めた $S-N$ 曲線から、S の 2×10^6

回における疲労強度は、 S_R で 19.1 kg/mm^2 という高い値が得られ、ガス圧接継手でも圧接部膨らみ径を小さくすることにより、規格降伏点 35 kg/mm^2 の約 55% の疲労強度が容易に得られることがわかった。M の場合にも、ほとんど膨らみ部中腹のふしの圧接部側で破断し、 2×10^6 回における疲労強度は、 S_R で 17.3 kg/mm^2 であり、従来のガス圧接継手の疲労強度より高い値が得られた。L の場合でも、S, M におけると同様の破断位置であり、 2×10^6 回における疲労強度は、 S_R で 14.2 kg/mm^2 となり、本実験中では最も低い値であった。

これらの結果から、自動ガス圧接継手の疲労強度は、圧接部膨らみ径により異なり、膨らみ径を小さくしなだらかにすることにより、疲労強度を向上させ得ることが明らかである。

c) 考察 (FEM による応力解析)

従来のガス圧接継手はふし付け根の応力集中が大きき、このため疲労強度が低下しているが、改良自動圧接継手は膨らみが小さくなるため、亀裂発生部の断面積が減少し公称応力は増加するが、ふし付け根の応力集中係数は小さくなり、後者の効果が大きいことにより疲労強度が向上すると考えられる。このためまず疲労発生点の形状を鉄筋軸方向断面で調査し、ふし付け根の半径 (ρ) と角度 (θ) を測定したところ、表—5 に示すように継手の径が大きいほどふし付け根の半径および角度が小さいことが実証された。

表—5 疲労亀裂発生点のふし付け根の形状測定結果

種類	試験数	半径 ρ (mm)	角度 θ (°)
母材 (B)	2	1.5	157
自動圧接継手	1.3 D (S)	1.7	148
	1.4 D (M)	1.0	143
	1.5 D (L)	0.5	140

さらに疲労試験結果と圧接部ふし付け根の応力集中との関係を定量的に把握するために、有限要素法 (FEM) による圧接部の静的応力集中の解析を行った。FEM 応力解析は 2 次元で行い、解析に用いた形状は継手試験片の断面を写真で拡大して輪郭を忠実に写しとったものである。また試験片は圧接面と軸心に関して対称とみなし、断面の 4 分の 1 について解析を行った。要素は一辺が 0.1 mm の三角形としたが、この大きさは各試験片で同じである。計算には HITAC 8700 を使用した。疲労破壊発生点に対応する位置の応力集中係数 α の計算値は表—6 に示したが、解析の前提条件から、この結果が実際の応力集中係数を表しているとは限らない。異形鉄筋の応力集中係数を光弾性試験によって求め、3 次元の集中係数は 2 次元のそれより 10% 程度小さいとした報告¹⁴⁾もある。

表—6 2×10^6 回疲労強度と応力集中係数の比較

種類	母材	自動ガス圧接継手			
		1.3 D	1.4 D	1.6 D	
	B	S	M	L	
疲労強度, S_R	σ_W (kg/mm ²)	22.5	19.1	17.3	14.2
母材に対する疲労強度比	σ_W/σ_{WB}^*	1.00	0.85	0.77	0.63
応力集中係数	α	1.75	2.17	2.39	2.79
母材に対する応力集中係数の比の逆数	α_B/α^*	1.00	0.81	0.73	0.63

* σ_{WB} , α_B は母材 (B) の値

しかし、各場合において同条件で解析しているのに、母材の値に対する比で検討することにより、これらの疑問は一応解消するものと考えられる。

応力集中係数と疲労強度との関係については、応力集中係数の影響は長寿命側ほど顕著に現れるので、 2×10^6 回における疲労強度 σ_W について比較することにする。表—6 は、各ガス圧接継手の母材に対する疲労強度比 σ_W/σ_{WB} と、各ガス圧接継手の母材に対する FEM による応力集中係数比 α/α_B の逆数 α_B/α 、すなわち、素材に対するガス圧接継手の応力集中度から導かれた理論的な疲労強度比ともいうべきものを比べたものである。表—6 から明らかなように、疲労試験結果と FEM 応力解析結果とはよく一致している。これは、片振り引張荷重においては、応力集中係数 α が 3 程度までは、切欠係数 β が α にほぼ等しいからである。

以上のことから、異形鉄筋ガス圧接継手の疲労亀裂は圧接部の膨らみの中腹のふし付け根から発生するが、この部分の応力集中は圧接部の膨らみ径の大きいほど大となり、この応力集中の程度によって圧接継手の疲労強度が定まることが判明した。

したがって異形鉄筋圧接継手の疲労強度改善には圧接部の膨らみ径を小さく、形をなだらかにして応力集中を少なくすることが必要であるが、自動ガス圧接工法は、実用的な静的強度を損なうことなく、この要求を満たし得ることが実証された。

7. ガス圧接継手の低温特性の改善

前節において、自動圧接法が継手の膨らみを精度よくコントロールできる利点を応用して、圧接継手の疲労強度を向上させ得ることを述べたが、この利点は、表面の応力集中の影響の大きい低温特性の向上にも応用できるはずである。また、低温特性には継手部の材質の影響が大きいのが、自動圧接機はこの点においても利用価値のあることが実験によって明らかとなった。

近年、石油に代る代替エネルギーの必要性から液化天

表-7 供試鉄筋の化学成分と機械的性質

種類	よび名	鋼種	化 学 成 分 (%)													機 械 的 性 質		
			C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	sol Al	N	C + $\frac{Mn}{6}$	YP (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	伸び (%)	
SD35	D51	デーコン	0.21	0.35	1.43	0.014	0.013	0.02	0.01	0.01	0.038	0.025	0.0063	0.45	38.1	55.6	31.7	
		電炉鋼	0.21	0.21	1.38	0.022	0.020	0.40	0.15	0.15	0.005	<0.002	0.0127	0.44	37.5	61.7	28.1	
		JIS規格	≤0.27	—	≤1.60	≤0.05	≤0.05	—	—	—	—	—	—	—	≥35	≥50	≥20	

然ガスの導入が増大し、LNG 貯蔵タンク
の建設が相次いで行われている。このタン
クには地下式鉄筋コンクリート構造のもの
が増加しつつあり、底版の鉄筋コンクリ
ートに D 51 などの太径鉄筋が用いられる。し
たがって、低温用の太径鉄筋継手が必要と
なるが、従来ガス圧継手は加熱を必要と
するため、熱による鋼材の冶金的变化によ
り、継手の低温靱性が劣化するので、LNG
タンク底版コンクリート用の鉄筋継手とし
ては不向きとされ使用されなかった。

そこで、自動圧接装置を用いて、継手の
膨らみの大きさ、形状を制御するととも
に、継手が冷却した後、同装置を用いて自
動的に一定時間、圧接部を再加熱（バーナ
焼準）し、表層部の組織を改善することにより低温靱性
を回復し、LNG タンク用としての使用を可能にする方
法を研究した。LNG タンク用継手の評価基準について
は、異なった考え方があるものと思われるが、この研究
においては、安全に使用できる継手の条件として、 -196°C
における引張強さが鉄筋の常温での規格値下限以
上であることとした。

(1) 実験方法

供試鉄筋として高炉材および電炉材の SD 35・D51 を
用いた。化学成分と機械的性質を 表-7 に示す。継手
の直径は 1.3 D, 1.45 D, 1.6 D (ただし、電炉鋼は 1.45
D のみ) とした。継手はいったん室温まで冷却した後、
自動機のバーナによって焼準を行ったが、ガス量 (63
NL/min), 加熱幅 (65 mm) 一定とし、加熱時間を 0~4
分間に変えて焼準条件を検討した。また風速 3 m/s の
風の中での焼準も行った。

焼準後の低温引張試験はすべて圧接のままの形で行
い、木綿ウェスを巻き付け、液体窒素に浸漬して冷却し
た。なお -100°C での引張試験も行ったが、この場合
は変成アルコールを用いた。試料数は -196° で 78 本、
 -100° で 36 本である。

(2) 実験結果

a) 低温引張試験結果

-196° の引張試験結果を 図-6 に示す。この図は鉄

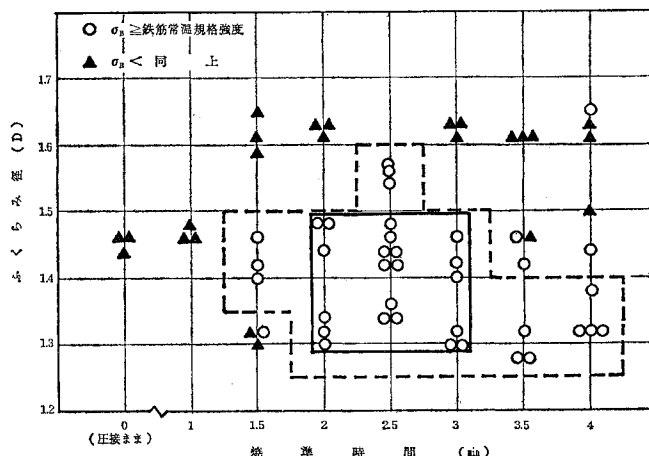


図-6 焼準圧接継手の -196°C の引張強度と焼準時間と膨らみ径の関係

筋常温規格に対する合否を焼準時間と膨らみの径で整理
したものである。デーコンの適正焼準条件は 図-6 の
破線の範囲となるが、現場作業条件としては安全サイド
として実線の範囲とするのがよい。またこの範囲におけ
る実際の引張強さは $57\sim 70\text{ kg/mm}^2$ であった。すなわ
ち、デーコン D 51 では、膨らみ径 $(1.4\pm 0.1)D$, 焼準
時間 (2.5 ± 0.5) 分とするのが適当である。なお、電炉
鋼については 1.45 D の場合適正焼準時間は 2 分のみで
範囲が狭い。また 3 m/s の風の中で焼準した継手の強
度は無風の場合に比べて劣化するどころか、むしろ高め
ですらあった。 -100°C における試験結果は表面疵か
ら破断した 1 本を除けば焼準の有無、膨らみ径の大小に
かわらず、すべて鉄筋常温規格強度を満足していた。
したがって素材鉄筋の低温靱性が優れていれば、ガス圧
接継手（斜めふし鉄筋）は圧接のままでも -100°C に
おいて十分な引張強さを有することがわかった。

なお、自動圧接継手の膨らみ径のばらつきは、この実
験の供試体 114 本について 表-8 に示したように、目
標 1.45 D の場合、標準偏差は 0.026 D 程度にすぎな
いので十分の余裕も
って $1.4D\pm 0.1D$ の
範囲で製作することが
できる。

表-8 ガス圧接部の膨らみ径のばらつき

目標径	試験体数	\bar{x}	σ_{n-1}
1.3 D	30	1.315	0.021
1.45 D	54	1.442	0.026
1.6 D	30	1.604	0.030

D : 公称直径

b) 焼準ガス圧接部
表層の顕微鏡組織と硬
さ

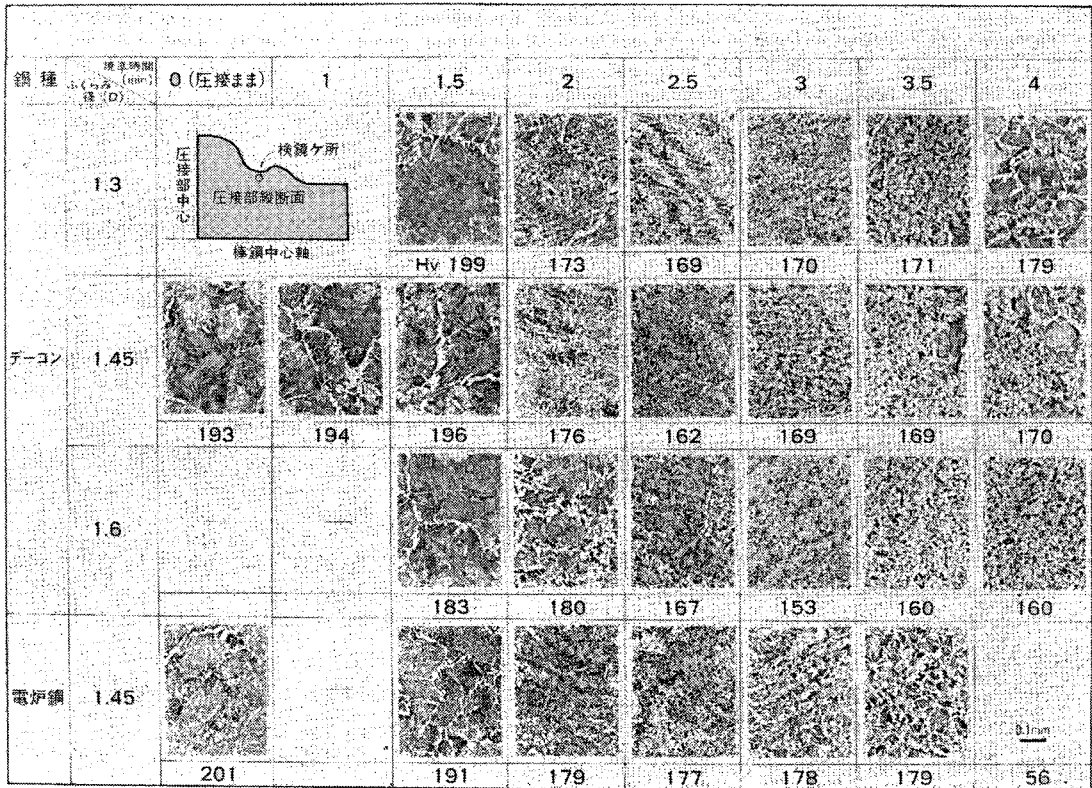


写真-10 圧接継手表面層部の焼準組織

圧接継手の極低温試験では、継手部での破断は膨らみの中腹のふしの圧接面側の付け根から生ずる。したがって、この部分について焼準温度、組織、硬さを調べた。写真-10 に焼準によって継手表面層の組織がいかに変化するかを示した。組織の変化は焼準時間、したがって焼準温度に対応している。すなわち焼準時間が不足のときは圧接ままの中間段階組織が変わっておらず、焼準時間が長すぎると組織が再び粗大化している。このことは図-7 に示した焼準時間と硬さの関係とも一致している。また電炉鋼とデーコンとの差はこれらの組織、硬さにも現れていて、焼準効果が素材材質によって異なることがわかる。

e) ガス圧接部表面の応力集中解析

以上のように組織が低温強度に大きな影響を及ぼすと同時に、継手の表面形状による応力集中も大きな影響をもつことが予想されるので、有限要素法による応力解析を行った。その結果は前節とほぼ同様で、継手破断位置の応力集中係数 α は3個の平均値で、1.3D で 1.76、1.45D で 2.40、1.6D で 3.50 と継手が大きくなるとともに急激に増大しており、これが焼準によって組織が改善されても継手の大きいときには低温強度の改善されない原因と思われる。

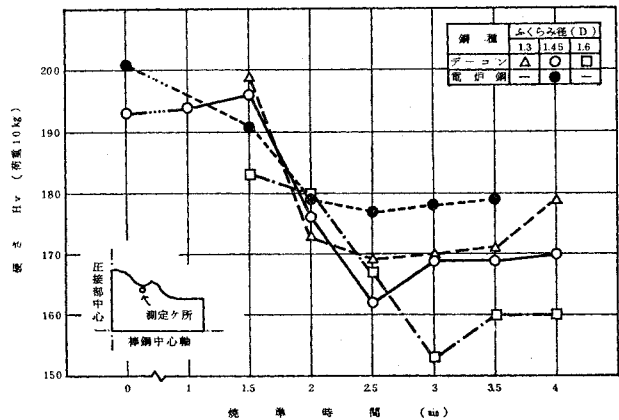


図-7 圧接部表面の応力集中部の硬さと焼準時間の関係

以上の実験結果より、ガス圧接継手は膨らみの大きさを管理してなだらかな形状に圧接し、いったん冷却した後、継手を適当な時間再加熱して表面層を焼準すれば、その組織を改善して低温靱性を高め、LNG タンク用の継手として必要な低温強度を付与し得ることが明らかとなった。そしてこのような継手形状の管理と圧接用パナによる熱処理は自動圧接装置を用いることによって現場的にも実施可能であり、さらに鉄筋としてその形状材質の適当なものを選べば許容焼準条件範囲が広く、施工

が容易で、信頼性も高いことがわかった。

8. 結 言

本論文はガス圧接継手の信頼性を向上するために、ガス圧接の自動制御化について研究した結果を述べたものである。さらに、自動ガス圧接の特徴を生かすことにより、継手の耐疲労性および低温強度を著しく改善し得ることについても言及した。本研究によって得られた成果を要約すると次のとおりである。

(1) 従来圧接工の手作業により、作業者の経験に頼って行われていた圧接工程を簡単なプログラムによって制御し、作業を機械化して、現場におけるガス圧接を自動化し得ることを確認した。

(2) 圧接条件を定量化し、ガス量、加熱時間、加熱雰囲気、圧縮量、風速、気温等の影響を調べ、また圧接の進行過程を解明して、自動機における圧接条件を設定した。

(3) 自動圧接装置によって継手の寸法精度とその再現性が著しく改善された。

(4) D25よりD51に至る各サイズの鉄筋の自動圧接継手について強度試験を行い、それぞれ十分な性能を有することを確かめた。また、径の異なる鉄筋の接合も、差が3~4mmのときは自動圧接を適用できることを示した。

(5) 従来ガス圧接継手の欠点とされていた疲労強度も、継手の応力集中を避けるように形状を管理することによって大幅に改善されること、またこのような継手は自動機によって実現できることを示した。

(6) ガス圧接継手の低温強度は、継手形状の管理と圧接後バーナで焼準を行うことにより著しく改善されること、また、このような継手の管理と焼準は自動機によって行うことができることを示した。

以上述べた本研究の成果が鉄筋コンクリート構造物の安全性の向上、鉄筋コンクリート工学および溶接工学の進歩に寄与することができれば、著者らのこのうえない喜びとするところである。

最後に、本研究の遂行にあたり、適切なご助言を賜った東京都立大学教授 村田二郎博士に深甚なる謝意を表す次第である。また、疲労実験については、同大学土木工学科 富田嘉雄氏にご協力いただいた。ここに付記して深く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 池野輝夫・横川孝男・高野重雄・今井達也：太径鉄筋の自動ガス圧接制御機の開発，実用化，鉄と鋼 Vol. 62, No. 4, S. 181, 1976.
- 2) 横川孝男・高野重雄・新見吉和・伊佐隆善：鉄筋の自動ガス圧接工法の開発とその施工例，土木学会誌，No. 8, pp. 35~41, 1978.
- 3) 日本圧接協会：自動ガス圧接工法による太径鉄筋継手の確性試験および再現性試験報告—新日鉄式自動ガス圧接機オートウェルバーによる実験—，昭和52年9月。
- 4) 日本圧接協会：鉄筋のガス圧接，昭和40年4月。
- 5) 谷餘土雄・高月輝夫：極太径デーコン D51 のガス圧接法，神戸製鋼所技報，Vol. 23, No. 3, pp. 112~116, 1973.
- 6) 土堅 秀・伊藤慶典・道下明雄：太径異形鉄筋のガス圧接法，土木学会第26回年次学術講演会講演概要集 第5部，pp. 157~160, 昭和46年10月。
- 7) 中野真治・池田文昭・有安 久：鉄筋コンクリート用棒鋼のガス圧接新工法について，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 949~952, 昭和45年9月。
- 8) 高野重雄・横川孝男・池野輝夫・一瀬康明：太径鉄筋の自動ガス圧接（第1報），溶接学会誌，Vol. 46, No. 2, pp. 26~32, 1977.
- 9) 高野重雄・横川孝男・池野輝夫：太径鉄筋の自動ガス圧接（第2報），溶接学会誌，Vol. 46, No. 9, pp. 71~78, 1977.
- 10) 藤盛紀明・斉藤鉄夫：鉄筋圧接部の超音波探傷試験の実用化に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 1165~1166, 昭和52年10月。
- 11) 富田勝信・渡辺信一：異形丸鋼の疲れ強さ，尼崎製鉄技報，No. 6, pp. 70~80, 1962.
- 12) 横川孝男・半沢 貢ほか：自動ガス圧接継手の疲労強度におよぼす圧接部ふくらみ形状の影響，鉄と鋼，No. 4, S. 407, 1978.
- 13) 新日本製鐵（株）製品技術研究所：自動ガス圧接工法による異形鉄筋継手の疲労強度向上に関する研究，土木学会第2回鉄筋継手工法小委員会，昭和52年12月。
- 14) 山崎徳也・佐藤政勝：疲労強度におよぼす異形鉄筋の径ならびに形状に関する研究，第22回構造工学シンポジウム，昭和51年1月。

(1979.3.18・受付)