

応力作用下で溶接された平板の変形挙動

DEFORMATION BEHAVIORS OF PLATES WELDED UNDER LOADING

鈴木博之*・堀川浩甫**

By Hiroyuki SUZUKI and Kohsuke HORIKAWA

The greatest concern of bridge engineers in the world is maintenance, repair and rehabilitation of bridges. Many bridges, which have been constructed in the age of high growth of economy, sustain the damages by increase of heavy traffics. They need repair and/or strengthening. Characteristics of repair and strengthening works are to be done under loading and vibration. There are few studies in relation to welding to members in service condition though the use of welding in repair and/or strengthening works has many advantages.

This paper describes some experimental and analytical studies on the effect of welding under loading on the deformation behaviors of plates.

1. 序 論

近年、橋梁の維持・管理、補修・補強についての関心が世界的に高まっている¹⁾。これは高度経済成長時代から低成長時代への変化に伴い、橋梁を新設することから既設の橋梁をいかに長く使用するかということへの変化のためである。高度経済成長時代に製作された多くの橋梁は通行車両の大型化・重量化により多くのダメージを受け、補修・補強を必要としている。交通量の増加あるいは設計荷重を越える重車両の増加は床版の劣化や疲労亀裂の発生を招き、これらの補修・補強のために縦桁の増設や当板による部材断面の増加が行われている。また、大型車の増加は幅員の不足を生じ、主桁の増設等の拡幅が必要となっている。

この補修・補強工事に溶接を用いることは多くのメリットをもっている。溶接による補修・補強は断面欠損がないことに加えて、施工が容易である。また、疲労亀裂を溶接によって埋め戻すことも可能であり、既設部材を補強して再使用することもできる。

このような補修・補強溶接の問題点には、

- 1) 橋梁の自重による静的荷重および通過交通による変動荷重が作用している。
- 2) 通行車両によって複雑な振動が生じている。
- 3) 天候、作業空間の制約などによる作業性の劣悪化。などがあり、製作時とは全く異なる未経験の問題点がある。ここで、3)は現在ある屋外作業時の施行管理基準²⁾を実情に合わせて修正すること、および溶接従事者への教育・訓練によって解決できると考えられる。したがって、1), 2)の問題点を避けるために多くの場合、ステーキングを用いて作用応力を軽減し、振動しないように交通規制をして作業は行われる。

補修・補強溶接に関する研究はケーススタディとなりがちであり、基礎的な研究はほとんど行われていない。わずかに、徳沢ら³⁾が引張応力下にある部材への溶接が機械的性質、残留応力分布に及ぼす影響について研究し、鈴木ら⁴⁾が振動下における溶接割れ、溶接金属の組織、機械的性質について調査しているだけであり、変形に関する研究はいまだに行われていない。

そこで、本研究では、引張部材に発生した疲労亀裂の補修・補強溶接、また引張および圧縮部材にカバープレートに溶接するときを想定し、応力軸に直角方向に溶接が施されるとき部材の変形に及ぼす影響について基礎的資料を得るため、応力作用下の平板に溶接を施し、

* 正会員 工修 大阪大学溶接工学研究所助手
(〒567 茨木市美穂ヶ丘 11-1)

** 正会員 工博 大阪大学溶接工学研究所助教授 (同上)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties.

Steel	Chemical composition (wt%)					Mechanical properties		
	C X100	Si X100	Mn X100	P X1000	S X1000	Y.S. kg/mm ² (MPa)	T.S. kg/mm ² (MPa)	E1. %
SS41-a	16	1	48	12	14	34 (333)	48 (470)	28
SS41-b	18	5	63	16	23	34 (333)	45 (441)	29

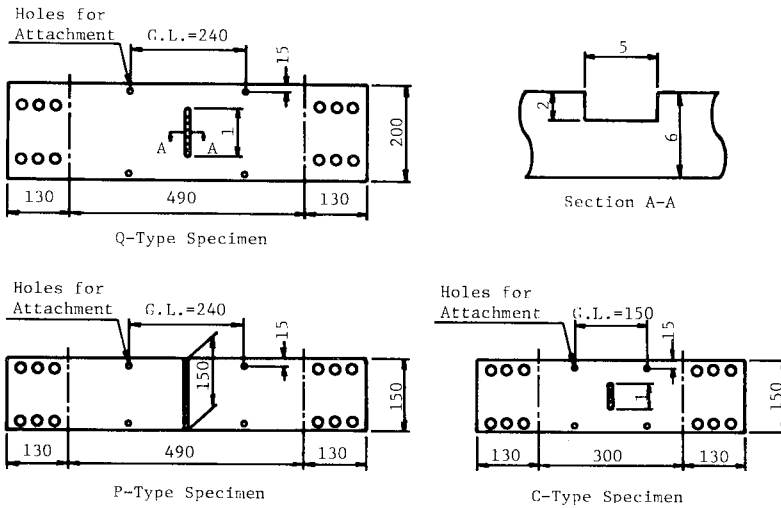


Fig. 1 Specimen configurations.

その変形挙動を検討した。

2. 実験方法

(1) 供試材および試験片

供試鋼材は板厚 6 mm の SS 41 であり、その化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。実験は 2 回に分けて行われたので、供試鋼材は 2 種類となった。試験片形状を Fig. 1 に示す。Q-Type 試験片には a 材、P および C-Type 試験片には b 材を使用した。各試験片に設けられた小径はクリップゲージ取付用治具を固定するためのものである。Q-Type 試験片の一部には図中に示すような溝加工を施した。Q および P-Type 試験片は引張荷重下において溶接されるので、作業空間を大きくするためにつかみ具間の距離は 490 mm としたが、C-Type 試験片は圧縮荷重下で溶接されるので、外荷重だけで座屈しないようにつかみ具間の距離は 300 mm とした。

(2) 溶接条件および試験条件

溶接は板厚方向の温度差がなくなるように溶け込みの深い炭酸ガスシールド溶接とした。溶接条件は、

- 1) 電流 200 A, 電圧 26 V, 溶接速度 30 cm/min, 入熱量 10 400 J/cm
- 2) 電流 170 A, 電圧 25 V, 溶接速度 15 cm/min, 入熱量 17 000 J/cm

の 2 種類とした。

試験条件を Table 2 に示す。

P 1 シリーズは作用応力の大きさの違いが変形に及ぼす影響について検討しようとするものである。したがって、溶接長は一定とした。P 1-0 は工場溶接を想定し、P 1-1 はステーシングを用いて応力を軽減した現場溶接、P 1-2 はステーシングを用いない場合の現場溶接を想定した。P 1-3 の作用応力は P 1-2 の 1.5 倍とし、開先加工を施した場合の現場溶接を想定した。溶接は板幅全長にわたって一度に施工した。溶接条件は 1) である。

Q 1 シリーズは溶接長の違いが変形に及ぼす影響を調べようとするものである。Q 1-0 は工場溶接を、Q 1-1~6 は現場溶接を想定した。Q 1-6 には溝加工を施さなかつ

た。溶接条件は 1) である。

Q 2 シリーズは Q 1 シリーズと同じ状態を想定したものであるが、溶接条件 2) で溶接し、溶接条件の違いが変形に及ぼす影響を調べようとするものである。Q 2-6 にも溝加工は施さなかつた。

Table 2 Experimental conditions.

Specimen No.	Applied Stress σ^{∞} kg/mm ² (MPa)	Normalized Weld Length 1/b	Steel
P1-0	0 (0)	1.0	b
P1-1	7 (69)	1.0	b
P1-2	14 (137)	1.0	b
P1-3	21 (206)	1.0	b
Q1-0	0 (0)	1.0	a
Q1-1	14 (137)	0.05	a
Q1-2	14 (137)	0.25	a
Q1-3	14 (137)	0.5	a
Q1-4	14 (137)	0.75	a
Q1-5	14 (137)	1.0	a
Q1-6	14 (137)	1.0	a
Q2-0	0 (0)	1.0	a
Q2-1	14 (137)	0.05	a
Q2-2	14 (137)	0.25	a
Q2-3	14 (137)	0.5	a
Q2-4	14 (137)	0.75	a
Q2-5	14 (137)	1.0	a
Q2-6	14 (137)	1.0	a
C1-0	0 (0)	1.0	b
C1-1	-7 (-69)	1.0	b
C1-2	-14 (-137)	1.0	b
C1-3	-14 (-137)	0.5	b
C1-4	-14 (-137)	0.25	b
C1-5	-14 (-137)	0.1	b

C1シリーズでは圧縮部材へのカバープレートの溶接を想定した。C1-0~2は作用応力の大きさの違いが変形に及ぼす影響について検討しようとするものである。C1-0は工場溶接と同じ条件に相当し、C1-1は作用応力を軽減した場合、C1-2は作用応力を軽減しない場合の現場溶接を想定した。C1-3~5は溶接長の違いが変形に及ぼす影響について検討しようとするものである。溶接条件は1)である。

(3) 実験方法

実験は荷重制御で行った。最初に所定の荷重を負荷し、この荷重を保持したまま溶接を行い、溶接開始から室温まで冷却し除荷するまでの変形をクリップゲージにより測定した。荷重の検定のため試験片中央の表裏面にひずみゲージを貼った。溶接条件2)ではビードのたれ落ち、裏面へのアークの突抜けが生じたので、溶接部直下および溶接部裏面にフラックステープバックングを貼ってこれらを防止した。

3. 実験結果および考察

(1) 引張荷重作用下の平板

P1シリーズの結果をFig.2に示す。図において横軸の時間は溶接アークスタート後の時間である。Start sideおよびEnd sideはそれぞれ溶接始末端側に取り付けたクリップゲージから得られたデータを表わしている。R.T.およびU.L.はそれぞれ室温まで冷却した後および除荷後を示す。

無荷重で溶接されたP1-0では、始端側は溶接開始とともにゆるやかに伸び、溶接終了直前に最大値を示す。その後徐々に縮み、室温まで冷却したときの残留変形は縮み変形となる。一方、終端側は溶接開始とともに縮み変形を示し、溶接終了と同時に伸び変形に移行している。その後再び縮み変形を示し、室温まで冷却したときの残留変形は縮み変形となる。終端側がいったん縮み変形を示すのは溶接熱により始端側が膨張するため試験片面内に曲げモーメントが生じるからである。始末端とも一時的に伸び変形を示すのは溶接部が膨張するためであり、その後冷却されるに従って溶接部が収縮し始めるので、最終的には縮み変形が残留する。

P1-1, 2の変形挙動の傾向はP1-0と似ているが、その変形量には著しい違いが認められる。この違いは溶接熱により材料の強度、剛性が低下している継手部に引張荷重が作用したためである。また作用応力の大きさの違いによる影響も明らかである。P1-2ではP1-1の2倍の応力が作用していたので、継手部に大きな塑性変形が生じたものと思われる。P1-1および2ではP1-0と異なり、溶接終了時に終端側の変形が始端側より大きくなっている。これも熱による材料の強度、剛性の低下と

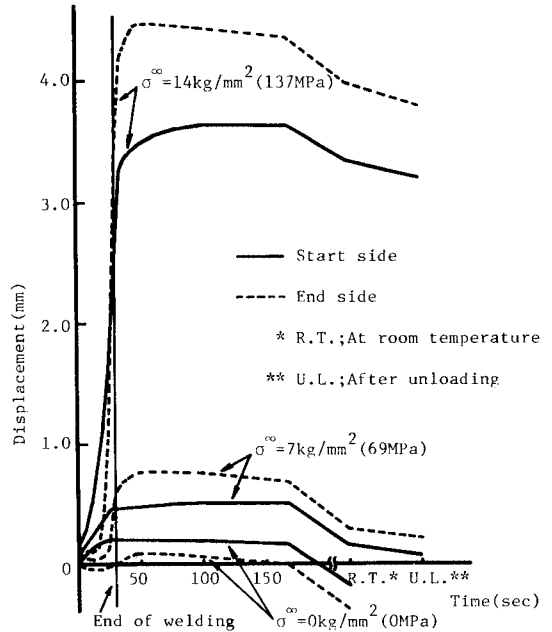


Fig.2 Deformation behaviors of P1 series specimens.

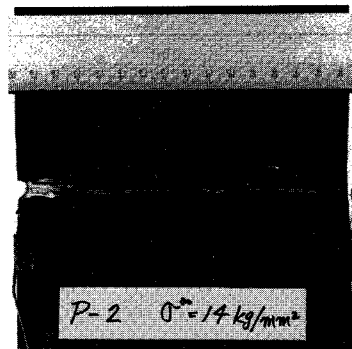


Photo 1 An example of weld crack at weld termination.

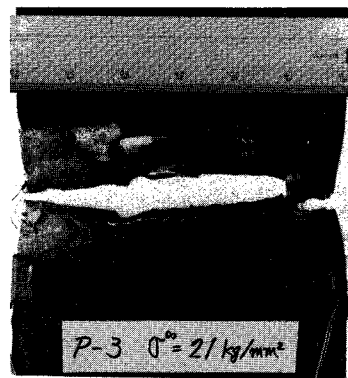


Photo 2 P1-3 specimen with applied stress 21 kg/mm² (206 MPa).

作用応力の相乗効果であると考えられる。P 1-2 では溶接終了直前に終端側に約 30 mm の割れを生じた (Photo 1)。この割れはビード中央部に位置し、板厚を貫通する縦割れであり、高温における延性破断であると思われる。

P 1-3 は Photo 2 に示すように溶接開始後約 20 秒経過したとき破断した。このときの溶接長は約 100 mm であった。破断したときの始端側の溶接中心線から 7.5 mm の位置の温度は約 400 °C であった。溶接部近傍の温度勾配は急激であるので、溶接部はさらに高温である。したがって、溶接熱により溶接部の剛性が低下あるいは喪失したために負荷荷重が未溶接部に作用し、延性破断したものと考えられる。

Q 1 および Q 2 シリーズの変形挙動は P 1 シリーズと類似の傾向を示していたので、Q 1 および Q 2 シリーズの各試験片の最大伸び変位、室温まで冷却後の変位および除荷後の変位について整理し、Fig. 3, 4 に示す。l/b

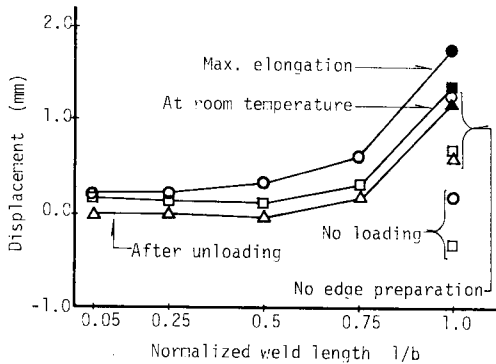


Fig. 3 Effect of weld length on deformation behaviors (Q1 series)
Solid mark shows weld crack occurrence.

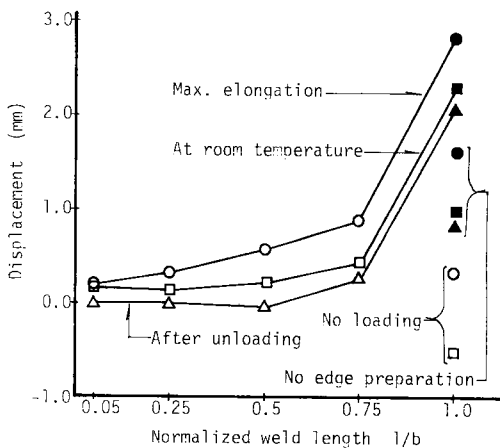


Fig. 4 Effect of weld length on deformation behaviors (Q 2 series)
Solid mark shows weld crack occurrence.

≥0.75 では最大変形時に終端側は始端側の2倍以上の変位を示したが、図においては始端側と終端側の平均値で表示した。

Fig. 3 より、溶接長が長くなるにつれて各時期における変形が大きくなるのがわかる。特に、l/b=0.75 を越えると変形は急激に増加している。l/b ≤ 0.5 では変形も微小であり、室温まで冷却した後の残留変位は溶接長によらずほぼ一定である。溝加工を施し、全幅にわたって溶接された Q 1-5 では P 1-3 と同種の割れが生じた。図中では黒めき記号で示す。一方、溝加工を施さなかった Q 1-6 では割れも生じなかつたうえ、各時期における変形も Q 1-5 より少ない。Q 1-5 では溝加工を施したことによって溶接部を含む断面に作用する応力が高くなったためであると考えられる。

入熱量の大きい Q 2 シリーズにおいても Q 1 シリーズと同様の傾向が認められ、l/b ≥ 0.75 と l/b ≤ 0.5 に大別できる。しかし、l/b=0.5 の最大変位について Q 1 と Q 2 を比較すると、Q 2 は Q 1 の約 2 倍の変位を示している。これは入熱量が異なるためである。溶接速度が速い方 (Q 1 シリーズ) が溶接部全長を早く高温にするため、変形は大きくなる—一般には考えがちであるが、変形は溶接速度の遅い Q 2 シリーズの方が大きかった。したがって、溶接速度が速く入熱量の小さい場合より、溶接速度が遅く入熱量の大きい場合の方が変形は大きいといえる。Q 2-5 および 6 では Q 1-5 同様割れを生じた。その長さは Q 2-5 で約 75 mm、Q 2-6 で約 20 mm であった。溶接部を含む断面に作用する応力の違いがこの長さの違いになったものと思われる。Q 1 シリーズも含めて考えると入熱量もこの割れに影響を及ぼすといえる。

(2) 圧縮荷重作用下の平板

C 1-0~2 の結果を Fig. 5 に示す。C 1-0 の変形挙動はこれまでに行った P 1-0 などと同様の挙動を示している。

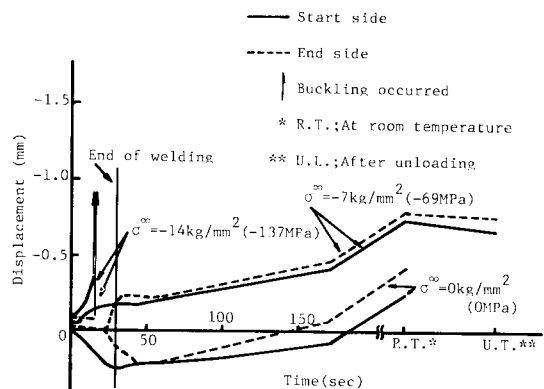


Fig. 5 Deformation behaviors of C 1-0 to 2 specimens.

C1-1は特徴的な挙動を示している。これまでの試験片では終端側は溶接開始とともにいったん縮み変形を示したのに対して、C1-1では伸び変形を示している。これは始端側溶接部が溶融されたとき圧縮荷重により溶接部が縮み変形を示すので、引張荷重下の平板とは逆に終端側が引張となる曲げモーメントを生じるためである。また、始端側、終端側のいずれも溶接終了前後でいったん変形が進行しなくなるのは、熱による膨張と外荷重による収縮がバランスするためであると思われる。室温まで冷却した後の残留変形をC1-0とC1-1で比較すると、C1-1はC1-0の2~3倍である。これは圧縮荷重が作用しているので高温あるいは溶融状態にある溶接部の収縮量が大きいためであると考えられる。C1-2は板幅全長にわたって溶接を試みたのであるが、板幅中央付近まで溶接したときに座屈した。Photo 3に座屈後の試験片を示す。

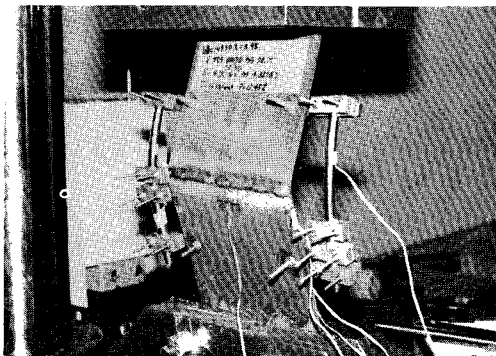


Photo 3 C1-2 specimen after buckling.

C1-2~5の結果をFig. 6に示す。C1-3は溶接終了と同時に、C1-4は溶接終了後約60秒経過したときに座屈した。l/b=0.1であるC1-5では座屈は起こらず、室温に至るまで徐々に縮み変形が進行した。室温まで冷却したときの縮み変形は始端側で約0.1 mm、終端側で約0.2 mmであり、無負荷で板幅全長にわたって溶接したC1-0より小さい残留変形であった。

C1-2~5の結果について解析的に検討を加える。簡単のために実験に用いた試験片は両端回転支持の偏心圧縮柱であるとすると、よく知られているセカント公式を用いることができる。

$$\sigma = \frac{P}{A} \left(1 + \frac{e}{k} \sec \frac{l}{2r} \sqrt{\frac{P}{A \cdot E}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、Pは外荷重、Aは断面積、eは偏心量、k'は核半径、rは回転半径、Eはヤング率である。

式(1)にC1-3に関する諸量を代入し、溶接前の偏心量eを求めると、

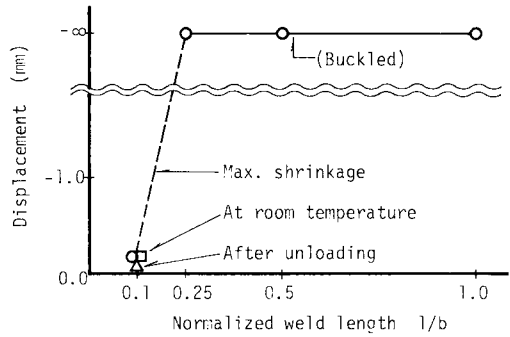


Fig. 6 Effect of weld length on deformation behaviors (C1-2 to 5 specimens).

$$e = 0.283 \text{ mm} \dots \dots \dots (2)$$

となる。なお、式(1)のσとしては試験片中央に貼ったひずみゲージにより求めた応力を用いた。

次に式(1)を変形し、|sec θ| ≥ 1の条件を用い、長方形断面であることを考慮すると次式を得る。

$$b \geq \frac{P}{t \cdot \sigma} \left(\frac{6e}{t} + 1 \right) \dots \dots \dots (3)$$

式(3)に式(2)の偏心量および試験片に関する諸量を代入し、σ = σ_rのときに座屈が生じるとすると、

$$b \geq 80 \text{ mm} \dots \dots \dots (4)$$

を得る。すなわち、C1-3が座屈を起こさないためには80 mm以上の板幅が必要である。ところが、C1-3においては溶接部は溶融あるいは高温状態にあり、剛性を失っているため、有効板幅は約75 mmとなっている。したがって、座屈を生じない最小板幅以下となり座屈したものと考えられる。C1-2についても同様に考えることができる。

次に、C1-4について検討する。溶接終了後約60秒経過したときに座屈を生じたのは溶接熱が未溶接部分に伝わり、未溶接部分の降伏応力が低下したためであると考えられる。そこで座屈時の温度分布を求めるために追加実験を行った。得られた座屈時の溶接線上の温度分布をFig. 7に示す。この図より、溶接始終端における座

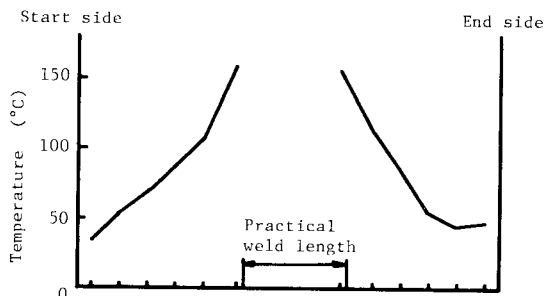


Fig. 7 Temperature distribution on center line at buckling.

屈時の温度は約 150°C であり、板端における温度上昇は大きくないことがわかる。また始端側、終端側に有意差は認められない。Fig. 7 の結果から、第一次近似として未溶接部の温度は一律 100°C であるとする。高温における引張試験の結果、100°C における降伏応力は室温の 75% まで低下することが明らかとなっている。それゆえ、式 (3) の σ_y に

$$\sigma_{y, 100^\circ\text{C}} = \sigma_y \times 0.75 \dots \dots \dots (5)$$

を用い、その他の諸量を代入すると

$$b \geq 101 \text{ mm} \dots \dots \dots (6)$$

となる。実験終了後実測した未溶接部の幅は 115 mm であった。溶接ひずみを考慮していないにもかかわらず、比較的よい一致を示しており、降伏応力が低下している未溶接部の有効板幅が最小板幅に近くなったために座屈したと考えられる。

最後に座屈しなかった C 1-5 について同様の解析を行う。式 (3) を変形すると

$$\sigma \geq \frac{P}{t \cdot b} \left(\frac{6e}{t} + 1 \right) \dots \dots \dots (7)$$

となる。この式に C 1-5 の諸量を代入し、 $\sigma = \sigma_y$ のときに座屈が生じるものとする、

$$\sigma_y \geq 18 \text{ kg/mm}^2 \text{ (176 MPa)} \dots \dots \dots (8)$$

を得る。すなわち、未溶接部の降伏応力が 18 kg/mm² (176 MPa) になったときに座屈が生じることになる。この値は室温における降伏応力の約 50% に相当する。高温における引張試験の結果によれば降伏応力は 300°C で室温の降伏応力の約 50% に低下することがわかっている。C 1-5 の未溶接部が 300°C 以上になることはなかったため、座屈は生じなかったと考えられる。

4. 結 論

本研究では引張あるいは圧縮荷重下にある平板に溶接を行い、その変形挙動を明らかにした。得られた結論は以下のとおりであり、供用中の橋梁に補修・補強溶接を施すときの基礎的資料としたい。

(1) $\sigma^\infty = 7 \text{ kg/mm}^2$ (69 MPa) 以下であれば、板幅全長にわたる溶接を施しても割れを生じることはなく、変形も微小であった。したがって、ステーキング等を用いて応力を 7 kg/mm² (69 MPa) 以下に軽減すれば溶接が板幅全長にわたったとしても一度に溶接することが可能であると考えられる。

(2) 溶接長 (l) と板幅 (b) の比 l/b が 0.5 以下であれば、 $\sigma^\infty = 14 \text{ kg/mm}^2$ (137 MPa) が作用している平板に溶接を施すことは可能であった。一方 $l/b \geq 0.75$ では割れを生じたり、溶接の途中で破断した。したがって、

$l/b \geq 0.75$ の場合には、溶接区間を $l/b \leq 0.5$ となるように分割し、一区間の溶接が完了し、剛性が十分回復してから次の溶接を行うことが必要であると考えられる。

(3) 溶接が変形に及ぼす影響には種々の因子が考えられるが、溶接速度が速く入熱量が小さい場合より溶接速度が遅く入熱量が大きい場合の方が変形が大きかった。

(4) $\sigma^\infty = 7 \text{ kg/mm}^2$ (69 MPa) 以下の圧縮応力であれば、座屈を生じることなく板幅全長にわたる溶接が施工できた。したがって、圧縮荷重が作用している部材においても、ステーキング等を用いて圧縮応力を $\sigma^\infty = 7 \text{ kg/mm}^2$ (69 MPa) 以下に軽減するならば溶接が板幅全長にわたったとしても座屈を生じることなく一度に溶接できると考えられる。

(5) $\sigma^\infty = 14 \text{ kg/mm}^2$ (137 MPa) の圧縮応力が作用している平板に $l/b \geq 0.25$ の溶接を施したところ座屈した。一方、 $l/b \geq 0.1$ では座屈を生じなかった。それゆえ、 $l/b \geq 0.25$ の場合には、溶接区間を $l/b \leq 0.1$ となるように分割して溶接する必要があると考えられる。

(6) 圧縮荷重が作用している平板の解析にセカント公式を適用した。その結果、熱による降伏応力の低下を考慮し、溶接ビード部を断面欠損として扱うことにより、座屈現象を説明することができた。

本研究を遂行するにあたり、本研究所 中辻義弘技官および伊美今朝則氏 (当時受託研究員) の協力を得た。記して謝意とする。

参 考 文 献

- 1) IABSE Reports Vol. 38 and 39: Maintenance, Repair and Rehabilitation of Bridges, IABSE Symposium Washington, DC, 1982, Introductory and Final Reports.
- 2) たとえば「道路橋示方書・同解説」
- 3) 徳沢・堀川: 応力作用下にある平板への溶接, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集 I -146, 昭和54年.
- 4) 鈴木ほか: 既設橋梁の振動下における現場溶接施工実験, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集 I -96, 昭和57年.
- 5) 佐藤・向井・豊田: 溶接工学, 理工学社.
- 6) Tokuzawa, N. and Horikawa, K.: Mechanical Behaviors of Structural Members Welded under Loading, Trans. of JWRI, Vol. 10, No. 1, pp. 95 ~ 101, 1981.
- 7) 富田ほか: 既設橋梁の現場溶接補修について, 土木学会第38回年次学術講演会講演概要集 I -160, 昭和58年.
- 8) 伊美ほか: 供用中の橋梁の補修における溶接上の一, 二の検討, 土木学会第38回年次学術講演会講演概要集 I -161, 昭和58年.

(1983. 12. 8・受付)