

平成 28 年度 修士論文

薄板と細管の抵抗溶接部の
溶融状態におよぼす下部電極形状の影響

三重大学大学院工学研究科
博士前期課程 機械工学専攻
松谷 亮太

目次

第 1 章 緒言	・ ・ ・ 1
第 2 章 実験装置及び実験方法	・ ・ ・ 3
2-1 供試材	・ ・ ・ 3
2-2 実験装置	・ ・ ・ 3
2-2-1 実験装置の仕様	・ ・ ・ 3
2-2-2 実験装置全体の仕様	・ ・ ・ 5
2-2-3 溶接時間	・ ・ ・ 5
2-3 電極形状の検討	・ ・ ・ 6
2-4 測定信号の校正	・ ・ ・ 6
2-5 実験条件	・ ・ ・ 7
2-6 断面観察方法	・ ・ ・ 7
第 3 章 実験結果	・ ・ ・ 9
3-1 観察結果	・ ・ ・ 9
3-1-1 断面観察結果	・ ・ ・ 9
3-1-1(a) 下部電極にフラット固定型電極を使用した断面観察	・ ・ ・ 9
3-1-1(b) 下部電極に R 電極を使用した断面観察結果	・ ・ ・ 9
3-1-1(c) 断面観察結果における下部電極形状による影響	・ ・ ・ 10
3-1-2 接触部全周の熔融状態	・ ・ ・ 10
3-2 電気抵抗変化	・ ・ ・ 11
3-2-1 下部電極形状による影響	・ ・ ・ 11
3-2-1(a) フラット電極を使用した場合の電気抵抗変化	・ ・ ・ 11
3-2-1(b) R 電極を使用した場合の電気抵抗変化	・ ・ ・ 12
3-2-2 溶接初期・末期の電気抵抗の平均	・ ・ ・ 13
3-2-2(a) 溶接初期・末期の電気抵抗における電極加圧力の影響	・ ・ ・ 13
3-2-2(b) 溶接初期・末期の電気抵抗における設定電流の影響	・ ・ ・ 13
3-2-3 電気抵抗の大幅な減少	・ ・ ・ 14
3-2-3(a) 電気抵抗が大きく減少する時刻における設定電流の影響	・ ・ 14
3-2-3(b) 電気抵抗が大きく減少する時刻における電極加圧力の影響	・ 14
3-2-4 電気抵抗の増加現象	・ ・ ・ 15
3-2-4(a) 電気抵抗の増加現象における各測定値による影響	・ ・ ・ 15
3-2-4(b) 電気抵抗の増加現象の詳細	・ ・ ・ 15

3-2-5	チリ発生条件	・・・16
3-3	電極変位	・・・17
3-3-1	管材の圧縮による変位	・・・17
3-3-1(a)	第1変位開始時刻における設定電流の影響	・・・17
3-3-2(b)	第1変位開始時刻における電極加圧力の影響	・・・18
3-3-2	管材圧縮後の電極変位	・・・18
3-3-2(a)	第2変位量における設定電流の影響	・・・19
3-3-2(b)	第2変位量における電極加圧力の影響	・・・19
第4章	考察	・・・21
4-1	電極加圧力の選定	・・・21
4-2	断面観察結果	・・・21
4-2-1	最適溶接条件	・・・21
4-2-2	最適溶接条件の考察	・・・22
4-2-2(a)	溶融状態における通電時間の影響	・・・22
4-2-2(b)	溶融状態における電極加圧力の影響	・・・23
4-3	接触界面の圧力測定	・・・23
4-4	溶接中の各測定値の検討	・・・24
4-4-1	電気抵抗変化	・・・24
4-4-1(a)	溶接初期・末期の電気抵抗	・・・24
4-4-1(b)	電気抵抗が大きく減少する時刻	・・・25
4-4-1(c)	電気抵抗の増加現象とチリ発生条件	・・・25
4-4-1(d)	電気抵抗の増加現象が発生する原因	・・・26
4-4-2	電極変位	・・・26
4-4-2(a)	設定電流が第1変位開始時刻におよぼす影響	・・・26
4-4-2(b)	第1変位開始時刻のバラつき	・・・27
4-4-2(c)	電極加圧力が第1変位開始時刻におよぼす影響	・・・27
4-4-2(d)	通電時間が第2変位量におよぼす影響	・・・27
4-4-2(e)	設定電流が第2変位量におよぼす影響	・・・28
4-4-2(f)	電極加圧力が第2変位量におよぼす影響	・・・28
第5章	結言	・・・29

参考文献

謝辞

第1章 緒言

1-1 研究背景

抵抗溶接法はアーク溶接法とならんで広く利用されており、特に最近では自動車、鉄道車両、航空機、家電製品、パイプなど、薄板を主体とする工業分野では組み立て技術の主要な軸をなすに至っている¹⁾。

一般的な抵抗溶接の原理を簡単に述べる。被溶接材を一对の水冷銅電極で加圧して挟み、大電流を通电させ、生じるジュール発熱を利用して被溶接材を加熱・溶融させて溶接を行う。抵抗溶接はジュール発熱を熱源とするため、発熱は材料の電気抵抗率および電流密度に依存し、これらが大きい場所ほど発熱量が大きくなる。電極の電気抵抗に比べて被溶接材の電気抵抗は大きく、また、銅電極より被溶接材の通电経路の方が小さくなるため、電極の発熱量に比べ被溶接材の発熱量が大きくなる。さらに、電極は水冷されているために、電極が溶融したり、被溶接材と電極の接触面が溶融したりする現象は生じない。

抵抗溶接では、①通电時間が短く、発生したエネルギーは有効に溶接部の形成に利用されるため、発熱は局所的であり、しかも発生したエネルギーの損失は電極に吸収されるため、被溶接材は熱影響をあまり受けない。②消耗品が電力だけで、生産コストが他の溶接方法に比べ低くできる。③溶接スイッチを押すだけで一連の溶接工程が自動で行われるため、溶接結果が作業者の技量に左右されることがない。などの利点がある。

現在、抵抗溶接は板材を重ね溶接する際に広く用いられている。被溶接材の材質、板厚が同一な場合は、被溶接材中の温度分布が接触面に対して対称となるため、容易に溶接部を形成できる。しかし、板厚の異なる重ね継手や形状の異なる部材の抵抗溶接では、被溶接材中の温度分布が接触面に対して非対称であり、接触面に溶接部を形成することが困難になる。また、形状の異なる部材の抵抗溶接では、被溶接材に負荷される応力が断面形状によって大きく異なる。そのため、接触面に溶接部を形成する前にどちらか一方の被溶接材だけが大きく変形する場合がある。つまり、形状の異なる部材の抵抗溶接では、被溶接

材の変形を抑え、接触面に溶接部を形成することが非常に困難である。

本研究では、上部電極の形状を工夫することで被溶接材の変形を最小限にした。また、下部電極は接触状態の異なる 2 種類の電極を用意した。それらの電極を用いて、管材と板材の抵抗溶接を行い、溶接現象を明らかにした。溶接電流、電極間電圧、電極加圧力、溶接中の被溶接材の変形量に相当する上部電極の変位を測定し、自ら設定することができる通電時間、設定電流値、初期加圧力を変化させて実験を行った。また、接触界面の熔融状態を観察するために断面観察を行った。

第 2 章 実験装置及び実験方法

2-1 供試材

本実験では、管材、板材共にステンレス鋼(SUS304)を使用した。Fig.2-1 に使用した管材と板材の断面図を示す。管材の寸法は外径 8mm, 内径 6mm であり, 長さを 19.2mm とした。板材は, 板厚 1.5mm とし, 形状は一辺 30mm の正方形とした。ステンレス鋼(SUS304)のミルシートによる化学組成と物性値を Table 2-1 および Table 2-2²⁾に示す。

2-2 実験装置

2-2-1 実験装置の仕様

Fig.2-2 に実験装置全体を示す。溶接機(ダイヘン製 PRAB-22)に電極加圧力が測定できるようにピストン部の下にロードセルを設置した。部品の材料はすべて機械構造用炭素鋼(S55C)である。電極加圧力の測定にはロードセル(KYOWA 製 LCR-G-20KNSA2)を使用し, 設置位置を Fig.2-3 に示す。ロードセルの定格容量は 20kN である。

制御装置には溶接電源と溶接の条件制御をする抵抗溶接用制御装置(ダイヘン製 RE-01)を使用する。制御装置本体の仕様は以下の通りである。

制御方法	定電流制御
制御可能範囲	3.0kA～30.0kA (二次電流制御)

定電流制御の場合, 設定できる条件は初期加圧時間, 溶接時間, 保持加圧時間などであ

る。

溶接における電極移動量の測定は、光変位センサ（SUNX 製 LM10）を使用した。上部電極に地面と平行な受光板を設置し、その変化量を光変位センサで測定する。取り付け位置を Fig.2-4 に示す。光変位センサの仕様は以下の通りである。

測定範囲	±10mm
測定中心距離	50mm
分解能	10Hz - 1 μm
	100Hz - 3.5 μm
	1kHz - 10 μm

溶接電流および電極間電圧の測定は溶接チェッカー（MIYACHI 製 MM-326B）を使用した。溶接チェッカーの仕様は以下の通りである。

溶接電流	測定範囲	1.00kA～19.99kA
	検出コイル	トロイダルコイル（MB-800K）
電極間電圧	測定範囲	0.1V～9.99V
	検出線	電極検出ピックアップ
通電サイクル	測定範囲	0.5～99.5cycle
電流・電圧測定値	実効値（測定区間の半サイクルの相加平均実行値）	
	ピーク値（全通電サイクル中の最大突頭値）	

溶接電流の測定は電流検出コイルを被測定溶接機の導体の一部にかける。

2-2-2 実験装置全体の仕様

Fig.2-5 に実験装置を示す。また、Fig.2-2 において破線部分で囲まれた部分を拡大し、Fig.2-6 に示す。実験装置の仕様は以下の通りである。

電源	単相交流式
制御方式	定電流制御
最大溶接電流	10kA
溶接時間	0～99cycle
加圧方式	空気式加圧
最大電極加圧力	約 4.98kN (0.5MPa)
変位分解能	10 μ m
電流・電圧測定値	実効値
測定範囲	
溶接電流	1.00kA～19.99kA
電極間電圧	0.10～9.99V
電極の変位	± 10 mm

2-2-3 溶接時間

本実験では溶接時間をサイクル (cycle) で表している。今回、実験している地域が 60Hz

を採用しているため、1cycle=1/60s ということになる。本論文では溶接時間について単位を秒(s)ではなく、サイクル(cycle)を採用している。

2-3 電極形状の検討

本実験では上部電極を 1 種類に固定し、下部電極を 2 種類使用した。まず、Fig.2-7 に下部電極にフラット固定型電極を使用した場合の円管と板材の設置概略図を示す。供試材は灰色で示している。管材は上部電極の深さ 15.2mm の穴に奥まで差し込むみ、上部電極から 4mm 突き出るように、付属のテーパ付きのコレットで固定する。また、板材はフラットな電極の上に置き、さらに上から板材を押し付けるような治具で固定する。特徴は両部材が電極に固定されているため、管材と板材は完全に固定されることである。次に下部電極に市販の R 電極を使用した場合の円管と板材の設置概略図を Fig.2-8 に示す。上部電極は Fig.2-7 と同じものを使用し、下部電極には市販の直径 16mm の R 電極を使用して実験を行った。特徴は管材は電極に固定されており動かないが、板材は R 電極と点接触しており板材に対して管材が傾かないことである。

2-4 測定信号の校正

すべての測定機器の信号はオシロスコープに取り込むことで表示させた。オシロスコープではすべての信号が電圧信号として表示されるので電圧信号をそれぞれの単位に校正する必要がある。以下にそれぞれの換算方法と値を示す。

ロードセル

ロードセルの電圧はシグナルコンディショナーを経由し、オシロスコープに表示させた。シグナルコンディショナーにロードセルの定格出力を設定し、オシロスコープ画面上に定

格容量 20kN となる電圧を表示させ、測定して単位の換算を行った。

- 空気ゲージ圧 (MPa) とロードセルの信号値との換算

ロードセルの定格容量 (20kN) は電圧値では 2.372V なので

換算式は

$$\text{荷重 (kN)} = \text{電圧値 (V)} \times (20\text{kN} \div 2.372\text{V})$$

で表すことができる。

- 空気ゲージ圧 (MPa) とシリンダー直径で求められる荷重

シリンダー直径は 0.11m, $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ であるので

計算式は

$$\text{荷重 (kN)} = \text{空気ゲージ圧 (MPa)} \times \text{シリンダーの面積}$$

光変位センサ

光変位センサの受光部には鉄に艶消しの塗料を塗ったものを用いた。光変位センサの換算にはマイクロメーターを使い、変位量が 40mm から 60mm の電圧を測定し、電圧と変位量の換算を行った。測定結果を Fig.2-9 に示す。この結果から 1V は 1.988mm と換算出来る。

溶接電流

溶接チェッカーでは実効値や電流のピーク値は測定できるが、実効値では測定区間の半サイクルの相加平均実効値が表示され、ピーク値では全通電サイクルの中の突頭値が表示される。オシロ値は正確に測ることが難しいためいくつかのデータの平均で換算式を作る。溶接電流の換算は、溶接チェッカーにて表示された実効値とオシロスコープに表示された電流の電圧値の 2 乗を半サイクルの実効値の範囲で平均し、平方根をとって算出した値を

比較して係数を求めた。なお、実効値の範囲は半サイクルの始まりから次の半サイクルの始まりまでとした。その結果を Fig.2-10 に示す。この結果より溶接チェッカーの実効値とオシロスコープの表示より算出した実効値はどの溶接電流でも係数は変わらず直線になっている。よって、この傾きを電圧値から溶接電流値への換算係数とし、その係数は 1V あたり 6.526kA である。

2-5 実験条件

本実験では、自ら設定することができる通電時間(cycle), 設定電流値(kA), 電極加圧力(kN)を変化させて実験を行った。ここに、本実験の実験条件における設定範囲を示す。

通電時間	6, 8, 10, 12, 14, 16 [cycle]
設定電流	8.0, 9.0, 9.9 [kA]
電極加圧力	1, 2, 3 [kN]

2-6 断面観察方法

本実験では接合部の溶接現象を明らかにするために、溶接部の断面観察を行った。断面観察の方法を説明するために、Fig.2-11 に溶接後の試験片の写真と断面の写真を示す。Fig.2-11 の黄色の線のように溶接後の試験片の中心を半分に切断し、下の写真のように断面を観察する。また、観察する際には断面を研磨し、塩酸で腐食を行った。研磨・腐食を行った断面を Fig.2-12 に示す。写真の左側が溶接機に向かって手前側になるように定めている。また、板材の溶融についての評価方法だが、Fig.2-11(a)のような「板材が溶融して接合している」、(b)のような「板材が溶融していない」、(c)のような「板材が溶融していても接合界面に金属が充填されていない」の 3 種類に分類することとした。

第3章 実験結果

3-1 観察結果

3-1-1 断面観察結果

3-1-1(a) 下部電極にフラット固定型電極を使用した断面観察結果

Fig.3-1 に、下部電極にフラット固定型電極（以後、フラット電極）を用いて溶接を行った場合の接合部の断面観察の結果をまとめた。2-6 で示した(a)を赤で、(b)を青で、(c)を紫で表している。これは通電時間と加圧力をそれぞれ変化させたものを枠で分け、その枠の中で3種類の溶接電流を並べてプロットしている。1つの条件に2つプロットがあるのは溶接部の2か所を観察したためである。その2か所の選定方法は溶接機に向かって奥側と手前側になるように全て定めており、上のプロットが奥側を、下のプロットが手前側を示している。Fig.3-1 を見て分かるように、6cycle での溶接では板材の溶融は確認されない。また、8cycle 以上の通電時間での溶接ではほぼ全ての条件において溶接機に向かって手前側は板材の溶融が確認できたが、奥側には板材の溶融は確認できなかった。また、電極加圧力や設定電流による断面観察結果への影響はほとんど見られなかった。

3-1-1(b) 下部電極に R 型電極を使用した断面観察結果

Fig.3-2 に、下部電極に市販の R 電極を用いて溶接を行った場合の接合部の断面観察の結果を示す。Fig.3-2 も Fig.3-1 と同じ方法でプロットしている。Fig.3-2 を見て分かるように、6cycle での溶接では板材の溶融はあまり観察されないものの、8cycle 以上の通電時間での溶接では板材の溶融が顕著に観察された。しかし、12cycle 以上の通電時間で加圧力が 2kN での溶接では板材が溶融していても金属が充填されていない現象が多く生じた。

3-1-1(c) 断面観察結果における下部電極形状による影響

Fig.3-1 および Fig.3-2 の 2 つのグラフを比べると、下部電極にフラット電極を用いる場合に比べて市販の R 電極を用いた場合では観察した 2 か所共に板材の溶融が確認できた条件が多く認められる。また、どちらか一方だけの溶融しか観察できなかった条件でも、フラット電極の結果のようにすべて手前側だけが溶融しているのではなく、R 電極の場合は奥側だけが溶融している場合も確認された。このように下部電極が R 電極の場合、板材が溶融しない条件や溶融する場所の傾向が見づらいため、同じ実験をもう一度行った。その結果を Fig.3-3 に示す。Fig.3-3 から通電時間 6cycle での溶接は板材の溶融がほとんど確認できず、8cycle 以上の通電時間での溶接では板材の溶融が顕著に観察された。また、10cycle 以上の通電時間で加圧力が 2kN での溶接では板材が溶融していても金属が充填されていない現象が生じた。Fig.3-2 と Fig.3-3 を同じグラフに示したものを Fig.3-4 に示す。Fig.3-4 も Fig.3-1~3 と同じ方法で示しているが、重なっている上側にプロットしているものが Fig.3-2 を示し、下側にプロットしているものが Fig.3-3 を示している。Fig.3-4 から 10cycle 以下の通電時間での溶接において板材の溶融が確認されない条件が多く認められた。また、12cycle 以上の通電時間での溶接で加圧力が 2kN においては板材が溶融していても金属が充填されていない条件が多く認められる。比較的安定して 2 か所共に板材の溶融が確認できた条件は通電時間が 14cycle 以上、設定電流が 9.0kA 以上、電極加圧力が 3kN での範囲であった。

3-1-2 接触部全周の溶融状態

本実験では接触部全周の溶融状態を確認するために、溶接後の試験片を管材の上部から削り込んでいき、管材が極力薄くなった状態で剥離する試験を行った。つまり、管材が剥がれた部分は板材の溶融はなく、管材が剥がれなかった部分は板材と管材が溶融接合また

は固相接合しているものだと考える。剥がれなかった部分を接合部分だとして、全周接合した場合を接合率 100%とした場合の接合率を決める。その例を Fig.3-5 に示す。一番上の写真のように全周管材が残らなかったものを接合率 0%とし、一番下の写真のように全周に渡り管材が残ったものを接合率 100%とする。また、各条件の接合率と接合していた場所をまとめた図を Fig.3-6 に示す。これは通電時間と電極加圧力をそれぞれ変化させ枠で分け、その中で設定電流毎に結果を並べている。上の数字が接合率を示し、下の円グラフが接合している方向を示している。また、上の図が下部電極がフラット電極の結果で、下のグラフが下部電極が R 電極の結果である。これを見て分かるように、R 電極に比べてフラット電極は接合範囲が狭く、断面観察でも見られたように溶接機に向かって奥側が接合されず、手前が接合しやすいという結果となっている。

3-2 電気抵抗変化

3-2-1 下部電極形状による影響

Fig.3-7 に本実験の溶接中の溶接部の電気抵抗の例を示す。本実験では交流電源を使用しているため、半周期毎に電流値が 0 になる。電気抵抗は電圧値と電流値の比として求めているため、電流値が 0 に近づくと抵抗値が非常に大きくなる。そこで、電流値が 0.2kA 以下になる所を除外して、電気抵抗の平均を求めた。平均した区間を Fig.3-7 の下部の拡大図に赤線で示す。この方法を用いて、半サイクル毎の平均の電気抵抗で整理した図を Fig.3-8 ~10 に示す。

3-2-1(a) フラット電極を使用した場合の電気抵抗変化

Fig.3-8(a)~(f)に下部電極にフラット電極を用いて溶接を行った場合の半サイクル毎の

電気抵抗を通电時間で分けて示す。通电時間が 10cycle を越えると電気抵抗はほとんど変化せず、ここでは変化の大きい通电時間 10cycle 以前を見たいため、通电時間 9cycle までを示す。また、横軸を時間で、縦軸を電気抵抗で取っている。通电時間 6cycle での溶接では電気抵抗が大きく減少した所で溶接が終了することが認められる。溶接の中ごろでは通电時間 10cycle での溶接(Fig.3-8(c))を見て分かるように、電気抵抗が急激に増加する現象が見られた。これほどまでに著しく増加した条件は通电時間 10cycle、加圧力 2kN、設定電流 8.0kA と 9.0kA の 2 条件だけであったが、僅かな電気抵抗の増加は他の条件でもいくつか認められる。下部電極にフラット電極を用いた場合、電気抵抗が急増する現象が見られたが、この急増現象に再現性があるのか否かを観察するためにもう一度同じ実験を行った。その実験の溶接中の半サイクル毎に平均を取った電気抵抗の図を Fig.3-9(a)~(f)に示す。これも Fig.3-8 と同様、横軸を時間で、縦軸を電気抵抗で取っている。Fig.3-9(a), (e), (f)を見て分かるように、溶接の中ごろでの電気抵抗の急増現象は通电時間 6cycle、設定電流 9.9kA、電極加圧力 2kN の条件、通电時間 14cycle と 16cycle、設定電流 9.0kA、電極加圧力 2kN の条件、通电時間 16cyc、設定電流 8.0kA、電極加圧力 2kN の条件の計 4 条件で発生した。今回、電気抵抗の急増現象が発生した条件は電極加圧力の影響を除けば、1 回目の条件とは全く異なるものであった。つまり、溶接の中ごろにおける電気抵抗の急増現象は通电時間や設定電流に関係なく、不規則に発生するものであり、制御することは不可能であると考えられる。

3-2-1(b) R 電極を使用した場合の電気抵抗変化

次に、下部電極に市販の R 電極を用いて溶接を行った場合の半サイクル毎の電気抵抗を Fig.3-10(a)~(f)に示す。これを見て分かるように、溶接前半と後半の推移の仕方は下部電極がフラット電極の場合と変わらない様に思われるが、フラット電極では見られていた溶接の中ごろでの電気抵抗の急増現象は見られなくなった。

3-2-2 溶接初期・末期の電気抵抗の平均

ここから Fig.3-8～3-10 に示してきた電気抵抗を通電時間，設定電流，電極加圧力，下部電極形状などで比較して詳細に検討する．まず，溶接初期と溶接末期の電気抵抗の値について述べる．Fig.3-11 に溶接中の半サイクル毎に平均した電気抵抗の例を示す．この図に赤く示す溶接開始 3cycle 分を溶接初期とし，青く示す溶接終了 3cycle 分を溶接末期としたときのそれぞれを平均した値をまとめた．

3-2-2(a) 溶接初期・末期の電気抵抗における電極加圧力の影響

このようにまとめた図を Fig.3-12 に示す．溶接末期の 3 サイクルというのは通電時間に関わらず，10cycle までの 3 サイクル分を取っている．これは横軸に電極加圧力を，縦軸に溶接初期および末期の電気抵抗の平均を取っている．設定電流 8.0kA，9.0kA，9.9kA を○，△，□印で示し，下部電極がフラット電極の場合を黒で，R 電極の場合を赤で示している．また，0.3mΩ 付近のプロットが溶接初期を示し，0.1mΩ 付近のプロットが溶接末期を示している．まずこれを見て分かるように，溶接初期は電極加圧力が高くなると電気抵抗は小さくなる．溶接末期は電極加圧力による電気抵抗の違いは認められなかった．下部電極形状による違いは溶接初期では見られなかったが，溶接末期では R 電極の方が電気抵抗が低くなる結果となった．

3-2-2(b) 溶接初期・末期の電気抵抗における設定電流の影響

次に縦軸の溶接初期および末期の電気抵抗の平均を変えずに，横軸に設定電流をとった図を Fig.3-13 に示す．電極加圧力 2kN，3kN を○，△印で示し，下部電極がフラット電極の場合を黒で，R 電極の場合を赤で示している．また，これも Fig.3-12 と同じように，0.3mΩ 付近のプロットが溶接初期を示し，0.1mΩ 付近のプロットが溶接末期を示している．

これを見て分かるように、溶接初期、末期に関わらず、電気抵抗の設定電流による違いは確認されなかった。

3-2-3 電気抵抗の大幅な減少

3-2-3(a) 電気抵抗が大きく減少する時刻における設定電流の影響

3-2-2 で示したように本実験では溶接初期の電気抵抗の値と溶接末期の電気抵抗の値に大きく差があることが認められる。その差は接触界面の粗さ、面積の変化や材料への入熱や管材の圧縮などの様々な原因により発生する。その中でも溶接の中ごろに電気抵抗が大きく減少するポイントが存在する。その電気抵抗が大きく減少する時間をまとめた図を Fig.3-14 に示す。Fig.8～Fig.10 に示した半サイクル毎に平均した図を使用して、溶接過程の前から見ていき滑らかに変化しなくなる時間と溶接過程の後ろから見ていき滑らかに変化しなくなる時間のそれぞれの時間の中間を電気抵抗が大きく減少する時間としている。Fig.3-14 は横軸に設定電流を、縦軸に電気抵抗が大きく減少する時間を取っている。電極加圧力 2kN, 3kN を○, △印で示し、下部電極がフラット電極の場合を黒で、R 電極の場合を赤で示している。これを見て分かるように、電極加圧力や下部電極形状に関係なく、設定電流が増加するとともに電気抵抗が大きく減少する時間が早くなることが認められる。また、下部電極が R 電極の方が電気抵抗が大きく減少する時間は遅くなり、フラット電極の場合は電気抵抗が大きく減少する時間が極端に早くなる条件が存在する。

3-2-3(b) 電気抵抗が大きく減少する時刻における電極加圧力の影響

次に縦軸の電気抵抗が大きく減少する時間は変えずに、横軸に電極加圧力をとった図を Fig.3-15 に示す。設定電流 8.0kA, 9.0kA, 9.9kA を○, △, □印で示し、下部電極がフラット電極の場合を黒で、R 電極の場合を赤で示している。これを見て分かるように、電極

加圧力が増加すると電気抵抗が大きく減少する時間は早くなっていることが認められる。

3-2-4 電気抵抗の増加現象

3-2-4(a) 電気抵抗の増加現象における各設定値による影響

次に Fig.8～Fig.10 でも説明したように、一時的に電気抵抗が急激に上昇する現象が生じる。電気抵抗の増加現象の有無を明らかにするために Fig.3-16 に示すように電気抵抗の急激な増加を著しい抵抗増加，僅かな抵抗増加，抵抗増加なしの 3 パターンに分類した。またそのそれぞれを赤，黄，緑で表し，Fig.3-17 にまとめて示す。これは溶接電流と加圧力の交点に通電時間 6～16cycle の結果を並べてプロットしている。また，上のグラフが下部電極がフラット電極の場合を示し，下のグラフが下部電極が R 電極の場合を示している。また，下部電極がフラット電極の場合において，上に並んでいるプロットが 1 回目の実験を示し，下に並んでいるプロットが 2 回目を示している。Fig.3-17 を見て分かるように，電気抵抗の増加現象は下部電極がフラット電極の場合にのみ生じることが分かった。それに加えて，電気抵抗の増加現象は低加圧の条件で著しく，電流値による影響は見られなかった。また，フラット電極の加圧力の低い範囲で発生しやすいことは確認できるが，確実に発生するという条件はなく，不規則に発生することも分かった。

3-2-4(b) 電気抵抗の増加現象の詳細

次に，電気抵抗の増加現象が確認された条件において電気抵抗が増加している時間と電気抵抗の増加量をまとめた表を示す。著しい抵抗増加を Table 3-1 に，僅かな抵抗増加を Table 3-2 に示す。これは左から通電時間，設定電流，電極加圧力，実験を何回目に行ったか，電気抵抗の増加現象が生じている時間，電気抵抗の増加量を順に示している。これを見て分かるように，電気抵抗の増加現象が生じている時間は 2.0～4.0ms と非常に短時間で

ある。また、電気抵抗の増加現象が生じている時間は設定電流や通電時間の影響を受けない。著しい抵抗増加での電気抵抗の増加量は $6.6\sim 30.8\text{m}\Omega$ であり、大きくバラつく。しかし、本実験の電気抵抗は $1.0\text{m}\Omega$ 以下で推移しているため、いずれにせよ大きい値であることに変わらない。それに比べ、僅かな抵抗増加での電気抵抗の増加量は $0.04\sim 0.25\text{m}\Omega$ であり、比較的小さい値である。電気抵抗の増加量においても通電時間や設定電流の影響を受けない。

3-2-5 チリ発生条件

本実験では、溶接中のチリの発生の有無を目視で観察した。ここで、各条件に対する溶接中のチリの有無を Fig.3-18 に示す。上の図は下部電極がフラット電極の場合、下の図は下部電極が R 電極の場合の結果を示している。そしてこの図は、設定電流と電極加圧力の交点にそれぞれの通電時間での結果を並べてプロットしている。赤色のプロットが非常に大きなチリを、黄色いプロットが比較的標準的なチリを、緑色のプロットがチリなしまたは微小なチリを表している。これを見て分かるように、微小なチリを含まない事とするとチリが発生したのは下部電極がフラット電極の場合のみであった。また、電極加圧力が低い条件でチリが発生しやすいことも確認できる。次にフラット電極における溶接中のチリ発生条件と電気抵抗の増加現象を比較するために、それぞれの図を同時に Fig.3-19 に示す。上の図が下部電極がフラット電極を使用した場合の増加現象を表し、下の図が下部電極がフラット電極を使用した場合のチリ発生条件を表す。これを見て分かるように、抵抗の増加現象とチリの発生は同じ傾向を示していることが認められる。つまり、チリの発生は電気抵抗の増加現象に依存し、電気抵抗の急激な増加はチリの発生を表していることがわかる。

3-3 電極変位

Fig.3-20 に本実験の溶接中の電極変位の例を示す。これは横軸に溶接時間を、縦軸に電極変位を取っている。本実験での電極変位は上部電極の変位量を測ったもので、上部電極が降下する場合をマイナスとしている。つまり、電極変位が大きくマイナス側になるということは、管材が潰れたことを表している。また、本実験での電極変位は 1 回目の大きな変位とその後に生じる 2 回目の小さな変位が存在する。今回、その前者を第 1 変位、後者を第 2 変位と呼ぶこととする。

3-3-1 管材の圧縮による変位

本実験では板材の厚さに対して管材が電極から突き出している長さが長いことや板材に対して管材の方が電流密度が高いことなどが理由で、全ての条件において板材が溶融する前に管材だけが溶融し、管材の座屈が生じる。また、Fig.3-3 や Fig.3-4 より通電時間 6cycle(100ms)での溶接では、板材の溶融はほとんど確認できておらず、通電時間 8cycle(133ms)での溶接で板材の溶融が確認され始める。つまり、板材が溶融し始めるのは 6cycle~8cycle の間であることが分かる。第 1 変位はそれ以前の変位であるため、第 1 変位は管材の座屈のみによる電極変位であると考えられる。つまり、本実験の条件内では全て第 1 変位量が 3mm 以上であるため、管材が座屈せずに溶接が終了したものはないと言える。

3-3-1(a) 第 1 変位開始時刻における設定電流の影響

ここで、第 1 変位が開始する時刻の図を示す。Fig.3-21 に下部電極がフラット電極の場合、Fig.3-22 に下部電極が R 電極の場合をそれぞれ示す。この 2 つの図は横軸に設定電流を、縦軸に第 1 変位が開始する時刻を取っている。下部電極の形状に関係なく、設定電流

が大きいほど第 1 変位開始時刻は早くなる。下部電極形状について比較するためにこの 2 つを重ねた図を Fig.3-23 に示す。同じ電流値での平均値を結ぶ線も追加した。これを見て分かるように、下部電極が R 電極の結果に比べてフラット電極での結果は、同じ設定電流での第 1 変位開始時刻のバラつきが大きいことが認められる。そのバラつきは特に電極加圧力 2kN において顕著であり、第 1 変位開始時刻が早くなる条件が見られることによるものであることが認められる。

3-3-1(b) 第 1 変位開始時刻における電極加圧力の影響

次に第 1 変位開始時刻について横軸を電極加圧力の変化に変更して示す。下部電極がフラット電極の結果を Fig.3-24 に、R 電極の結果を Fig.3-25 に示す。下部電極がフラット型、R 型に関わらず、電極加圧力が増加すると第 1 変位開始時刻は早くなることが認められる。下部電極形状について比較するためにこの 2 つを重ねた図を Fig.3-26 に示す。同じ電流値での平均値を結ぶ線も追加した。平均を結んだ線の傾きを見て分かるように、下部電極が R 電極の場合に比べてフラット電極の場合は第 1 変位開始時刻の電極加圧力での影響が小さいことが認められる。また、同じ設定電流で比較すると、下部電極が R 電極の場合に比べてフラット電極の場合の方が第 1 変位開始時刻が全体的に早くなることが認められる。

3-3-2 管材圧縮後の電極変位

先ほど説明した第 1 変位が管材の圧縮・座屈によるものであったのに対し、第 2 変位は管材の圧縮に加えて、板材の溶融により管材が押し込まれた分の変位も関わっていると考える。そこで、それぞれの下部電極における第 2 変位量を表す図を、Fig.3-27 に下部電極がフラット電極の結果、Fig.3-28 に R 電極の結果として示す。この図は横軸に各通電時間を、縦軸に第 2 変位量を取っている。また、設定電流 8.0kA、9.0kA、9.9kA の結果をそれ

ぞれ黒，赤，青で色分けしている．これを見て分かるように，下部電極形状に関わらず，通電時間が長くなるにつれて第 2 変位量は増加し，通電時間が 10cycle 以上になるとほとんど変化しない．次に下部電極形状による違いを明らかにするためにこの 2 つの図を重ねた図を Fig.3-29 に示す．これは各下部電極形状の結果に見分けがつくようにフラット電極を△印で，R 電極を○印で示している．これを見て分かるように，通電時間による第 2 変位量の推移は同じ傾向を示しているが，全体的に R 電極の方が第 2 変位量は大きくなっている．

3-3-2(a) 第 2 変位量における設定電流の影響

次に横軸に各設定電流を取り，第 2 変位量を図に示す．下部電極がフラット電極の結果を Fig.3-30 に示す．電極加圧力 2kN を○印で，3kN を△印で示し，通電時間 6，8，10，12，14，16cycle をそれぞれ黒，赤，青，橙，緑，紫で示している．これを見て分かるように，第 2 変位量に対する設定電流の影響はほとんど見られなかった．次に同じ方法で下部電極が R 電極の結果を Fig.3-31 に示す．電極加圧力 3kN では設定電流を変化させても第 2 変位量はほとんど変わらない．しかし，電極加圧力 2kN において，設定電流の増加とともに第 2 変位量が増加していくことが認められる．また，通電時間が長い方がその傾向は大きくなっていくことも認められる．

3-3-2(b) 第 2 変位量における電極加圧力の影響

そこで第 2 変位量の電極加圧力による影響を考察するために，横軸に電極加圧力を取った図を次に示す．下部電極がフラット電極の結果を Fig.3-32 に示す．設定電流 8.0kA を○印で，9.0kA を△印で，9.9kA を□印で示し，通電時間 6，8，10，12，14，16cycle をそれぞれ黒，赤，青，橙，緑，紫で示している．これを見て分かるように，下部電極がフラット電極における第 2 変位量は電極加圧力による影響もほとんどないことが分かる．次に

同じ方法で下部電極が R 電極の結果を Fig.3-33 に示す. 通電時間が短い条件では電極加圧力が増加すると第 2 変位量も増加する. また, 通電時間が長い条件では上記の結果が逆転し, 電極加圧力が増加すると第 2 変位量は減少することが認められる.

第4章 考察

4-1 電極加圧力の選定

本実験の電極加圧力の条件範囲は 1kN, 2kN, 3kN である。しかし、電極加圧力 1kN の実験は本論文の結果から除外している。ここで、下部電極に R 電極を使用し、本実験条件の中で一番低エネルギーである通電時間 6cycle, 設定電流 8.0kA, 電極加圧力 1kN の溶接後の試験片の断面を観察した。その結果を Fig.4-1 に示す。上に示す写真が溶接機に向かって手前側を、下に示す写真が溶接機に向かって奥側を示している。これを見て分かるように、板材は溶融しない。しかし、この条件は電極加圧力が低いことが原因で接触抵抗が大きくなるため、板材と R 電極が接合した。つまり、通電時間や設定電流を増加させても板材と電極は接合すると推測される。そのため、電極加圧力 1kN の実験は本論文の結果から除外している。

4-2 断面観察結果

4-2-1 最適溶接条件

本実験の溶接条件において第3章にも示したように R 電極での溶接において比較的良好的な継手を得ることが出来た。ここで第3章でも示した R 電極を使用した場合の溶接後の接合部の断面観察結果をもう一度 Fig.4-2 に示す。これを見て分かるように、通電時間 14cyc 以上、設定電流 9.0kA 以上、電極加圧力 3kN での溶接において溶接機の奥側、手前側の両側で板材の溶融が確認されたため、本実験ではこの条件を薄板と細管の抵抗溶接での最適溶接条件とする。本実験では全周の溶融状態は観察していないため、片当りの影響が大き

く現われた溶接機に向かって奥と手前の 2 カ所の溶融状態で溶接結果を判断している。

4-2-2 最適溶接条件の考察

4-2-1 で示したような本実験における最適溶接条件を電極変位の観点から考察する。本実験では全ての溶接条件において上部電極から管材が突き出した部分は全て潰れ切っている。これは接合界面が両電極の中心に存在しないことや管材と板材の電流密度の違いなどから板材に対して管材の入熱の方がしやすいためである。そのため、板材が溶融する前に管材が座屈してしまう。管材の座屈は 3-3-2 で示したように第 1 変位に現われている。また、板材の溶融は第 2 変位に現われていると考えている。

4-2-2(a) 溶融状態における通電時間の影響

そこで下部電極に R 電極を使用した溶接中の電極変位の第 2 変位量を示した図を Fig.4-3 に示す。これは横軸に通電時間を、縦軸に第 2 変位量を取っている。電極加圧力での区別はず、設定電流値毎に色を分けている。また、同じ溶接条件について 2 回ずつ溶接を行い、2 回分の結果を示しているがそれに対する区別はしていない。これを見て分かるように板材の溶融が比較的確認しにくい通電時間 6, 8cycle の溶接での第 2 変位量は小さいことが分かる。通電時間が短い条件では第 2 変位が生じる時にはすでに通電が終了しているため、板材が溶融し、板材に管材が押し込まれる量は少なく第 2 変位量は小さくなったと考えられる。また、第 2 変位量は通電時間の増加とともに増加していき、通電時間が 10cycle を超えてくるとほとんど変化しない。管材が潰れ切ってから比較的長時間の電流を流すことができる通電時間 14, 16cycle の条件で板材が溶融しやすいのである。これらの要因から、通電時間 14cycle 以上の溶接条件で板材の溶融が顕著に現われた理由は、管材が完全に潰れ切り、その後の電流の多くを板材に与えることが出来たためであると考えられる。

4-2-2(b) 溶融状態における電極加圧力の影響

次に電極加圧力による第 2 変位量の影響を表す図を Fig.4-4 に示す。これは横軸に電極加圧力を、縦軸に第 2 変位量を取っている。設定電流 8.0kA を○印で、9.0kA を△印で、9.9kA を□印で示し、通電時間 6, 8, 10, 12, 14, 16cycle をそれぞれ黒, 赤, 青, 橙, 緑, 紫で示している。これを見て分かるように、通電時間が短い条件での第 2 変位量は電極加圧力が高い方が大きくなり、通電時間が長い条件になるほど電極加圧力が高い方が第 2 変位量は小さくなることが確認できる。通電時間が短い条件では第 2 変位が生じる時にはすでに通電が終了しているため、余熱のみを利用して第 2 変位が生じているので、電極加圧力がそのまま電極変位量に影響を与えられと考えられる。また、通電時間が長い条件では第 2 変位中にもまだ通電は終了していないため、電極加圧力が低い 2kN では界面での接触抵抗が大きく両部材が入熱しやすく電極加圧力が低い範囲で第 2 変位量が大きくなったのだと考えられる。さらに Fig.4-2 を見ると、電極加圧力 2kN の通電時間が長い溶接条件で接合界面に金属が充填されていないものが多く確認できる。これは、電極加圧力が低いことで界面での接触抵抗が大きくなったため、板材が勢いよく加熱されるのと同時に、電極加圧力が低いことで押し込むことが出来ないことが原因であると考えられる。

4-3 接触界面の圧力測定

本実験では下部電極形状による接合結果に大きく違いが見られたため、溶接初期の接合部の圧力の測定を行った。工業用の感圧紙を利用して、部材同士の接触面の圧力分布を測定した結果を Fig.4-5 に示す。上の写真は下部電極がフラット電極の結果で、下の写真は下部電極が R 電極の結果である。写真の上部が溶接機に向かって奥側を示し、写真の下部が溶接機に向かって手前側を示している。感圧紙が赤く発色した部分に 2.5MPa 以上の圧力がかかっていることを表し、赤が濃いほど圧力が高いことを表す。これを見て分かるよう

に、下部電極が R 電極の場合は全周均一に圧力がかかっていることが分かる。しかし、下部電極がフラット電極の場合は奥側は R 電極の場合より濃い赤を示すにもかかわらず、手前側はほとんど圧力がかかっていないことが分かった。フラット電極はその電極の形状によって板材を完全に固定してしまうため、溶接機の僅かな歪みやたわみが接触圧力のバラつきを産み出してしまうと考えられる。この溶接機の歪みやたわみは目視で発見することは出来ず、実際の現場で使用される溶接機にもこの問題はあり得ることである。そのため、上下の両部材をどちらも完全に固定してしまうのは接合のバラつきに大きく影響を与えることを理解しなければいけない。

4-4 溶接中の各測定値の検討

4-4-1 電気抵抗変化

4-4-1(a) 溶接初期・末期の電気抵抗

第 3 章の Fig.3-12, 3-13 において溶接初期および末期の電気抵抗をまとめたが、プロットを最大最小のエラーバー(Error bar)にして Fig.4-6, 4-7 に示す。溶接初期において電極加圧力が高い方が電気抵抗が低くなったのは接触圧力が増加すると接触抵抗が減少するためである。それに加えて、下部電極が R 電極の方が電極加圧力の影響を受けやすいという結果も認められた。これは 4-3 で説明したように接触面に圧力のバラつきが発生しているためであると考えられるが、接触圧力の違いがあるにも関わらず、溶接初期の電気抵抗に下部電極形状の違いはほとんど見られない。つまり、溶接初期は上部電極から管材が突き出している長さが長く、金属が本来持っている電気抵抗が大きいいため、初期電気抵抗に対する接触抵抗の影響が小さくなったのだと考えられる。それに対して、溶接末期は管材は座屈して潰れ切っている状態であるため、下部電極による違いが顕著である。いずれにして

も、このように下部電極による初期および末期の電気抵抗の影響は認められるものの、それぞれの電極形状における電極加圧力による初期および末期の電気抵抗の影響はほとんど見られなかった。

4-4-1(b) 電気抵抗が大きく減少する時刻

第3章の Fig.3-14, 3-15 において電気抵抗が大きく減少する時間についてまとめているが、プロットをエラーバー(Error bar)にして Fig.4-8, 4-9 に示す。電気抵抗が大きく減少する理由は管材の圧縮によるものであると考えているため、設定電流値の増加とともに電気抵抗が大きく減少する時刻は早くなり、電極加圧力の増加とともに電気抵抗が大きく減少する時刻は早くなる。

4-4-1(c) 電気抵抗の増加現象とチリ発生条件

Fig.3-17 に電気抵抗の増加現象についてまとめている。電気抵抗の増加現象は下部電極形状によって大きな違いが認められた。溶接初期にはほとんど見られなかった下部電極形状による電気抵抗の影響であったが、溶接中間時期で大きく差が生じた。特に電極加圧力 2kN において R 電極では全く見られない電気抵抗の増加現象がフラット電極では顕著に確認された。また、Fig.3-18 に目視で確認したチリ発生条件についてまとめている。Fig.3-17 と Fig.3-18 を比較して分かるように電気抵抗の増加現象が生じる条件とチリが発生する条件は完全に一致する。溶接初期では部材の温度は低く、接触面の圧力のバラつきに関わらず全面が粗いため下部電極の形状に電気抵抗はほとんど影響を受けない。しかし、溶接中間時期では部材の温度は上昇し、接触面は部材の表面が接触抵抗により軟化することと電極加圧によって馴染んでくる。この時、下部電極が R 電極の場合は接触面の圧力が均一なため全面均等に馴染むのに対して、フラット電極の場合は接触圧力の高い所だけが馴染む。そのため、溶接中間時期において下部電極がフラット電極の場合は部材間の接触に差が生

まれるようになる。接触の圧力の高いところで電流が集中し、急激に発熱するため、それがチリとなって吹き飛び、電気抵抗の急激な増加につながると推測する。

4-4-1(d) 電気抵抗の増加現象が発生する原因

そこで、溶接中の電気抵抗の増加現象を詳細に検討するために時間軸を拡大して Fig.4-10 に示す。電圧、電流も同時に示す。これを見て分かるように、電気抵抗が著しく増加するのは電圧値の絶対値が急激に増加し、同時に電流値の絶対値が 0 に近づいていることが認められる。電流値は一時的に 0 になっているため溶接用の電気回路が一時的に断線しかけていることを意味する。絶縁が生じる理由は、接合界面で温度が上がり軟化した金属が一気に吹き飛ぶからだと考えられる。それがチリとして目視で確認できると考えられる。このことから電気抵抗の増加現象がチリの発生と関係があると言える。このチリは接触圧力が高い部分で電流が集中することで生じる。つまり、このチリは接触部にバラつきが生じている下部電極にフラット電極を用いた場合においてさらに接触部のバラつきを産み出していると考えられる。

4-4-2 電極変位

4-4-2(a) 設定電流が第 1 変位開始時刻におよぼす影響

第 3 章の Fig.3-21, 3-22 に示した第 1 変位開始時刻に対する設定電流の影響の図をプロットからエラーバー(Error bar)に変えて Fig.4-11, 4-12 に示す。第 1 変位が開始する時刻は下部電極形状に関係なく設定電流が大きいほど早くなる。第 1 変位は管材の圧縮および座屈による変位であるが、電流値が高くなると管材の温度上昇が促進され、圧縮および座屈する時刻が早くなるためである。

4-4-2(b) 第 1 変位開始時刻のバラつき

第 1 変位が開始する時刻は下部電極が R 電極に比べてフラット電極の場合はバラつきが大きいと第 3 章で示した。このバラつきは電気抵抗の増加現象が影響していると考えているため、第 1 変位が開始する時刻と電気抵抗の増加現象が生じる時刻の関係を Fig.4-13 に示す。これは電気抵抗の増加現象が生じた条件のみを示している。横軸に第 1 変位が開始する時刻を、縦軸に電気抵抗の増加現象が生じる時刻を取っている。これを見て分かるように、このグラフは傾き 1 の直線でおおよそ近似される。つまり、第 1 変位が開始する時刻と電気抵抗の増加現象が発生する時刻はおおよそ同じであることを示しており、早い時刻に増加現象が発生した条件では第 1 変位の開始時刻が早くなっている。下部電極が R 電極の結果に比べてフラット電極での結果が、同じ設定電流での第 1 変位開始時刻のバラつきが大きい理由は、早い時刻にチリ（電気抵抗の増加現象）が発生し、接合界面の金属が吹き飛ぶことで変位が開始することによるものである。

4-4-2(c) 電極加圧力が第 1 変位開始時刻におよぼす影響

第 3 章の Fig.3-24, 3-25 に示した第 1 変位開始時刻に対する電極加圧力の影響の図をプロットからエラーバー(Error bar)に変えて Fig.4-14, 4-15 に示す。第 1 変位が開始する時刻は下部電極形状に関係なく電極加圧力が大きいほど早くなる。電極加圧力が低い方が接触抵抗が高くなるため、接触部での温度上昇は早い。しかし、上部電極から管材が突き出している長さが長い時には管材自体の金属による電気抵抗での発熱の割合が大きいため、電極加圧力が高い方が管材の圧縮（第 1 変位）が開始する時刻は早くなる。

4-4-2(d) 通電時間が第 2 変位量におよぼす影響

Fig.4-16, 4-17 に Fig.3-27, 3-28 のプロットをエラーバー(Error bar)に変え、それぞれの通電時間での平均値を線で結んだ図を示す。下部電極がフラット電極の場合に比べて R

電極の場合の第 2 変位量が大きくなっているのは、R 電極の場合は接触面全周が均一に板材が溶融されるのに対してフラット電極の場合は溶接機に向かって奥側が全く溶融しない。溶融していない部分があるため管材は板材に押し込まれることが出来ず、フラット電極の第 2 変位量は小さくなると考えられる。

4-4-2(e) 設定電流が第 2 変位量におよぼす影響

Fig.3-30, 3-31 に示した第 2 変位量による設定電流の影響の図を平均値を線で結び Fig.4-18, 4-19 に示す。フラット電極の場合は設定電流の影響はほとんど受けない。しかし、R 電極の場合は電極加圧力が 2kN の場合のみ設定電流の増加とともに第 2 変位量は増加する。特に通電時間が長い条件においてそれは顕著である。下部電極に R 電極を用い、電極加圧力が 2kN での溶接でこのような結果が見られたのは接触面全周が均一に接触している状態で接触抵抗を十分に活用できる低加圧の条件であるからだと考えられる。電極加圧力が高いと接触抵抗は十分に活用されにくく、設定電流の 2kA ほどの変化では違いが出ないのだと考えられる。

4-4-2(f) 電極加圧力が第 2 変位量におよぼす影響

Fig.3-32, 3-33 に示した第 2 変位量による電極加圧力の影響の図を平均値を線で結び Fig.4-20, 4-21 に示す。フラット電極の場合は電極加圧力の影響はほとんど受けない。しかし、R 電極の場合は通電時間が短い条件では電極加圧力の増加とともに第 2 変位量は増加し、通電時間が長い条件では電極加圧力の増加とともに第 2 変位量は減少する。通電時間が短い条件では第 2 変位中にはすでに通電が終了しているため電極加圧力が高い方が変位量は大きくなる。それに比べて通電時間が長い条件では第 2 変位中も電流が流れているため、電極加圧力が低い方が接触抵抗が大きくなり接触部での温度が上昇しやすい。そのため、通電時間が長い条件では電極加圧力が低い方が第 2 変位量は大きくなる。

第5章 結言

- ・両部材を治具で固定すると、接触状態のバラつきによって溶接結果が大きく影響される.
- ・電気抵抗の急激な増加現象はチリに起因するもので、下部電極を R 電極にすることで抑制できる.
- ・下部電極にR電極を使用し、通電時間233, 266ms(60Hz, 14, 16cycle), 設定電流9.0, 9.9kA, 電極加圧力3kNで板材に管材が溶接できる.

参考文献

- 1) 奥田滝夫，坂口章，仲田周次，中根豊，松山欽一：抵抗溶接現象とその応用
第一編 スポット溶接 [上]，溶接学会抵抗溶接研究委員会，(1981)，p3
- 2) 日本鉄鋼協会編：第3版 金属便覧IV 鉄鋼材料，試験・分析，(1981)
p161-162
- 3) 太田 雄：薄板と細管の抵抗溶接中の管材温度上昇の検討
平成 26 年度 修士論文
- 4) 佐波 考洋：抵抗スポット溶接中の被溶接材の電気抵抗変化
平成 22 年度 修士論文

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切にご指導を賜りました三重大学大学院工学研究科鈴木実平教授，川上博士准教授，尾崎仁志助教に深く感謝します．

なお，本研究で用いたデータと実験装置は三重大学大学院工学研究科博士前期課程平成 22 年度修了の佐波孝洋氏，平成 24 年度修了の村上翼氏，平成 26 年度修了の太田雄氏，三重大学工学部平成 25 年度卒業の山崎鉦作氏との共同研究によるものです．ここに記して，諸氏に深く感謝致します．さらに本研究を遂行するにあたり多大なご協力を頂きました材料機能設計研究室の院生の方々，学部生の皆様方に深く感謝致します．最後に幾多のご協力を頂きながら，個々に御氏名を掲載できなかった方々に対し，その非礼をお詫びするとともに，謹んで御礼申し上げます．

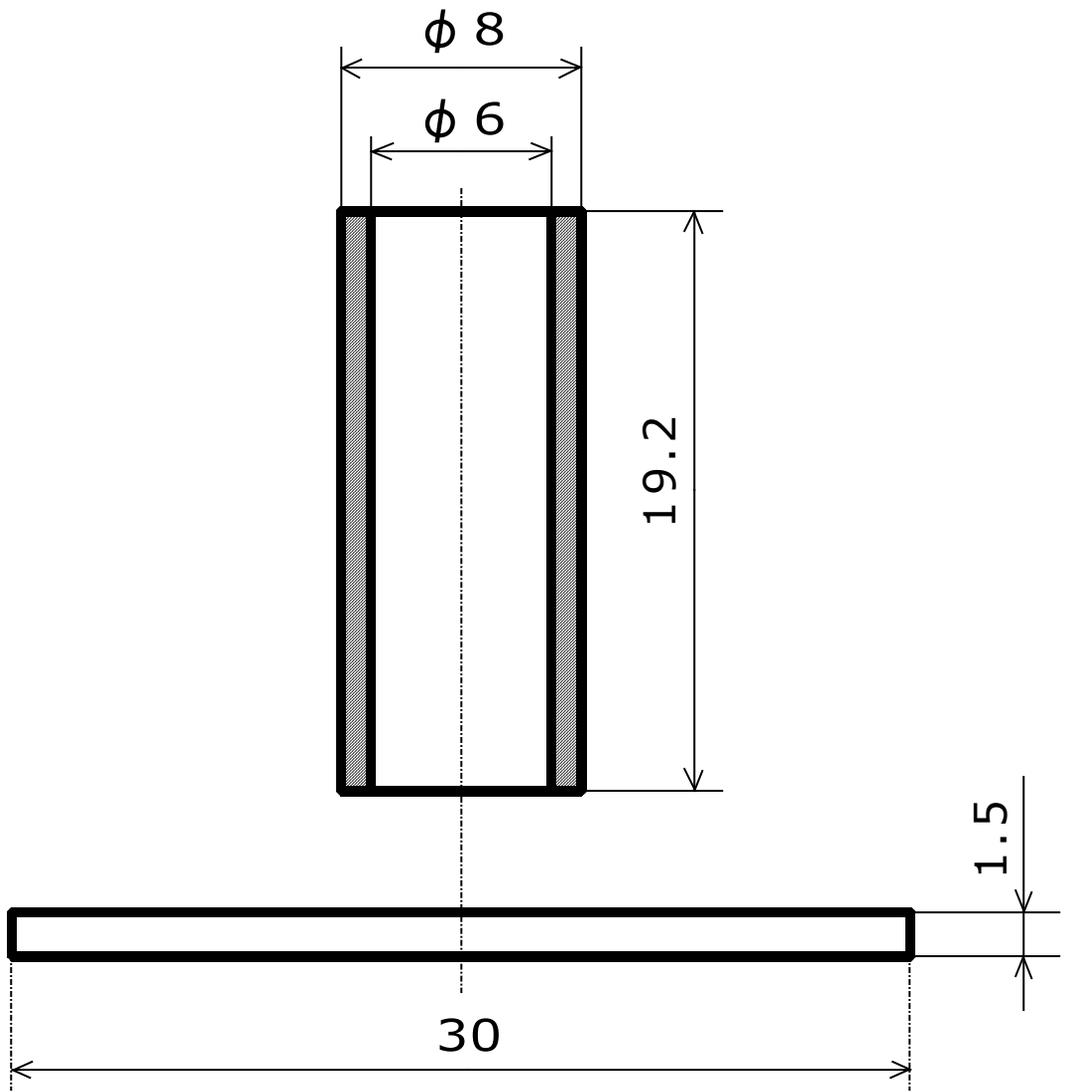


Fig.2-1 Cross-section of
tube and plate

Table 2-1 Chemical composition
of SUS304 (mass%)

Type	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.06	0.5	1	0.05	0.27	9	18.5

Table 2-2 Properties of SUS304

Type	Density[kg/mm ³]	Specific heat capacity[J/kg · K]	Melting point[°C]
SUS304	8060	503	1398~1420

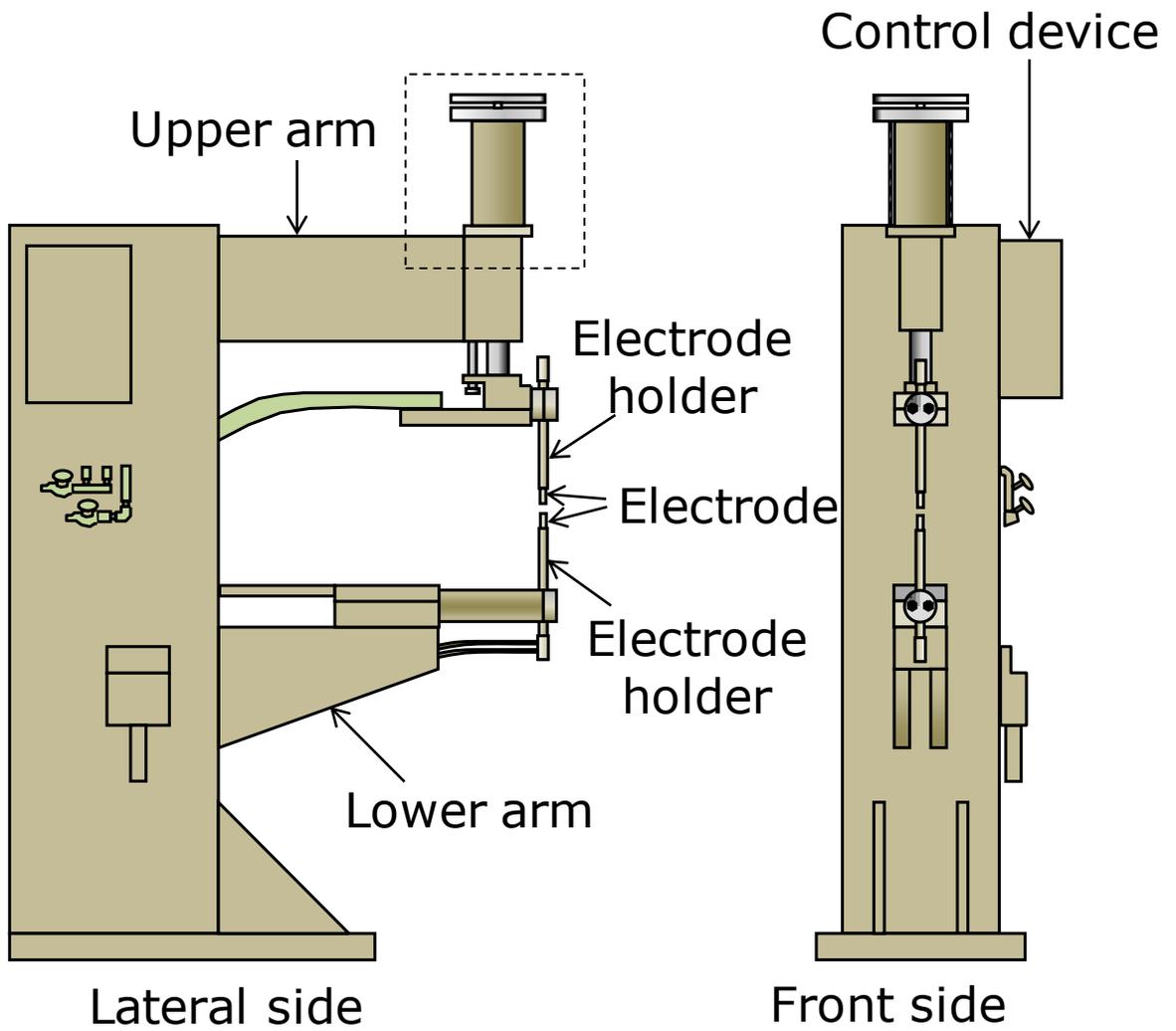


Fig.2-2 Resistance welding machine

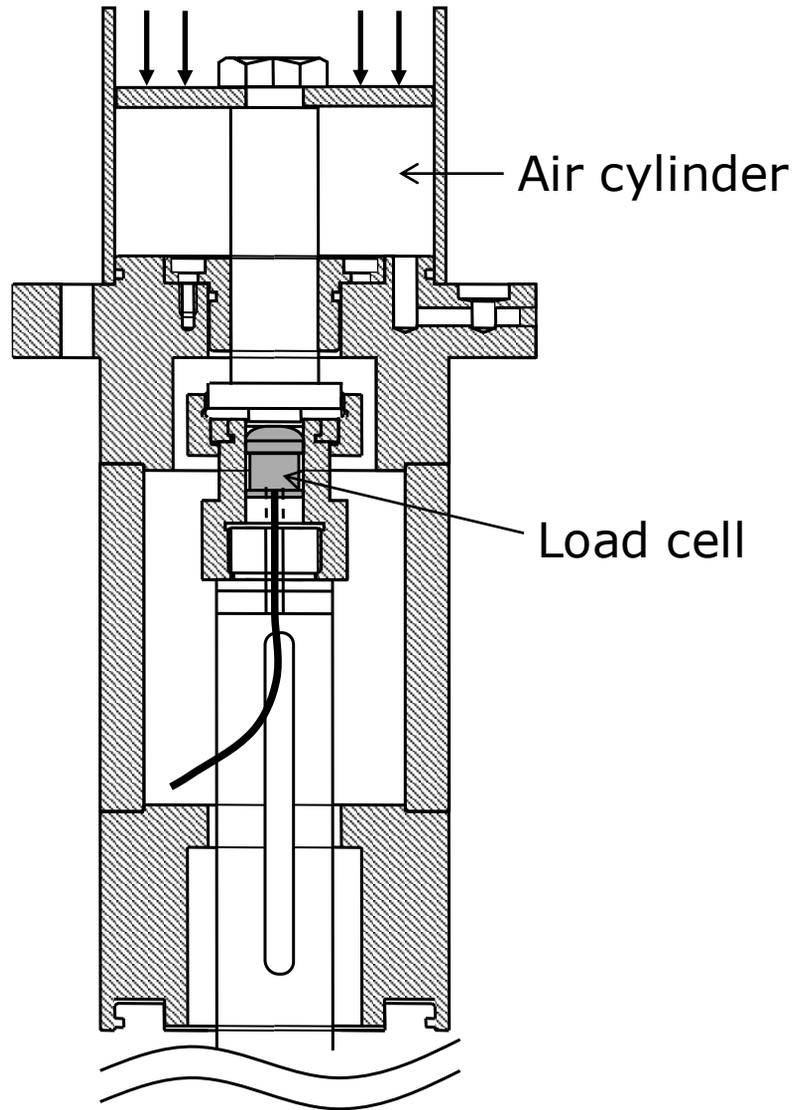


Fig.2-3 Insertion position of load cell

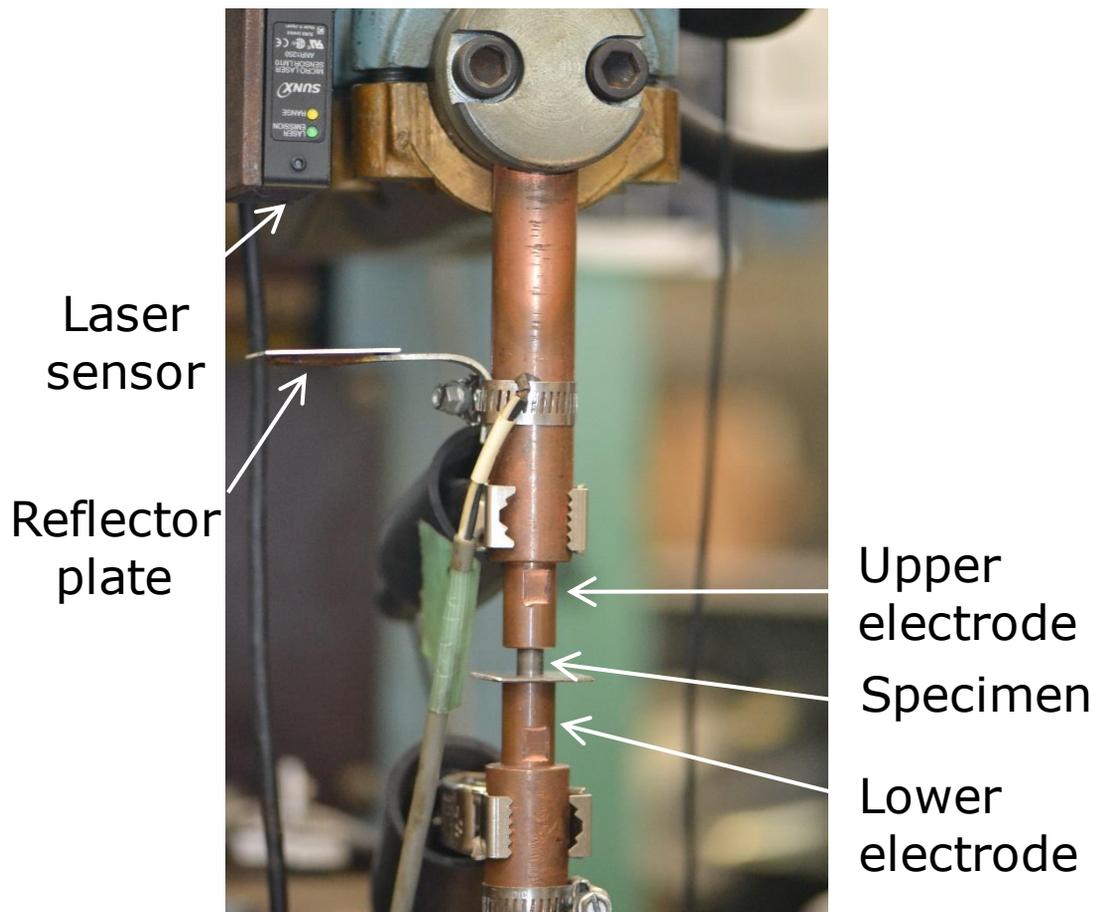


Fig.2-4 Measurement method of electrode displacement by using laser sensor

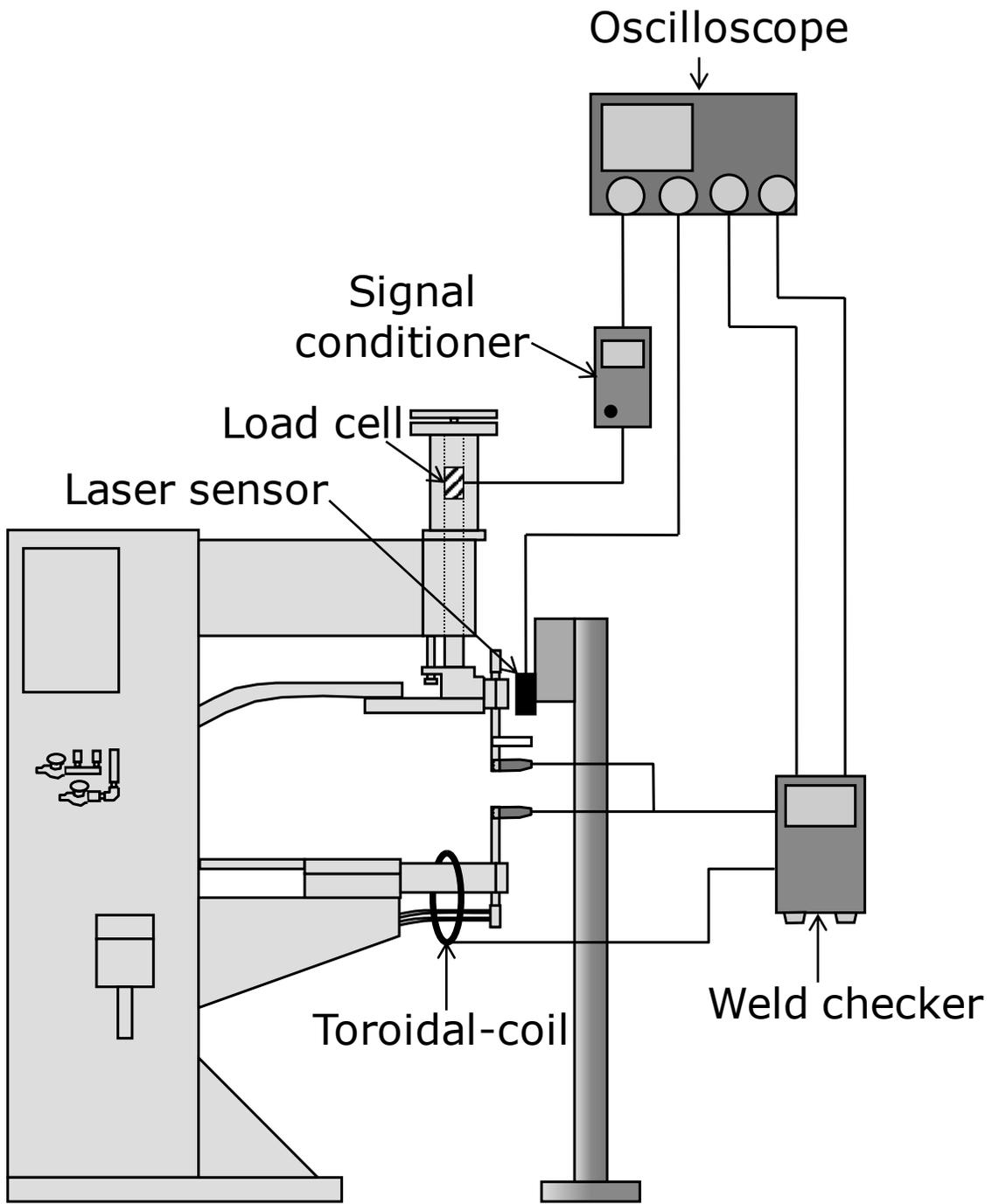


Fig.2-5 Resistance welding machine after modification

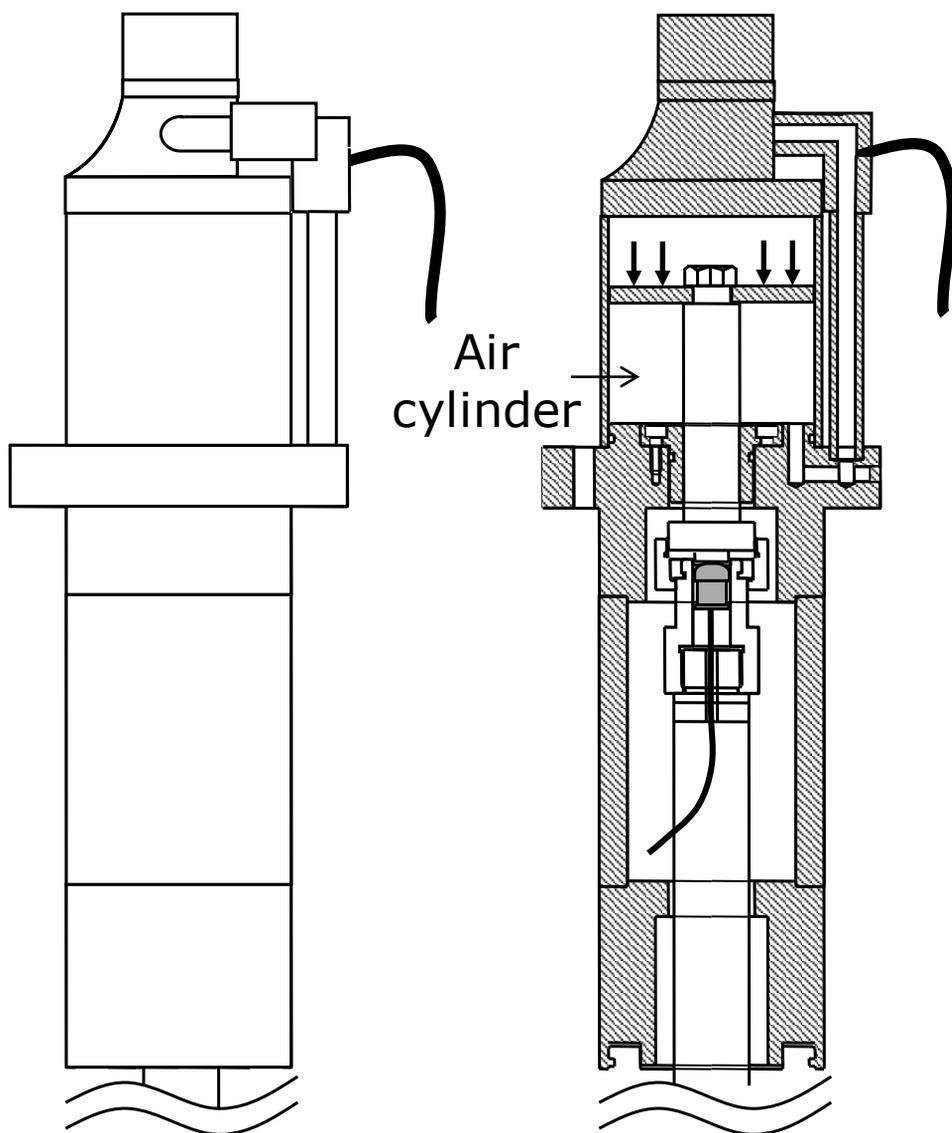


Fig.2-6 Cylinder pressurizing with compressed air

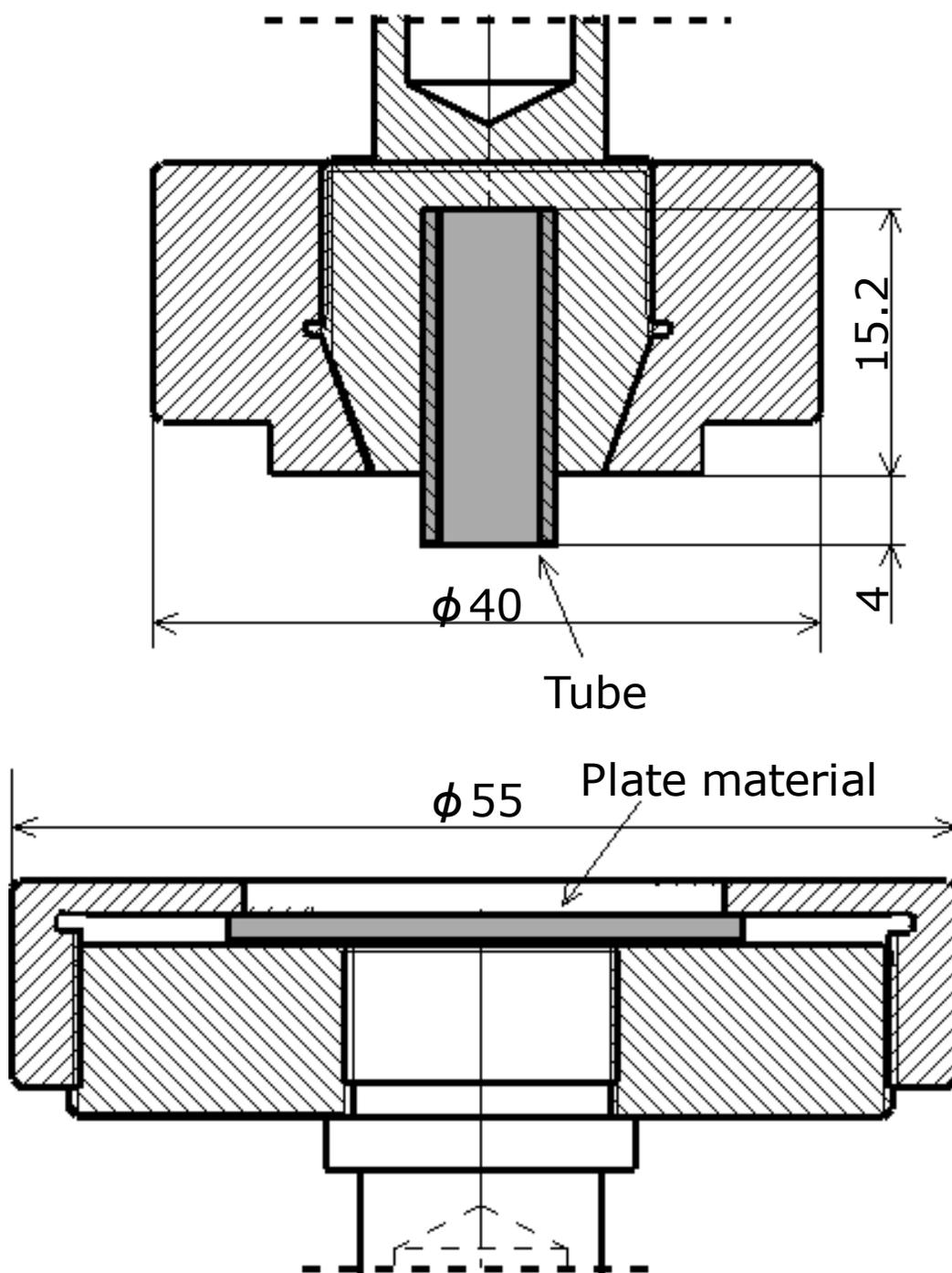


Fig.2-7 Schematic drawing of upper electrode and flat lower electrode

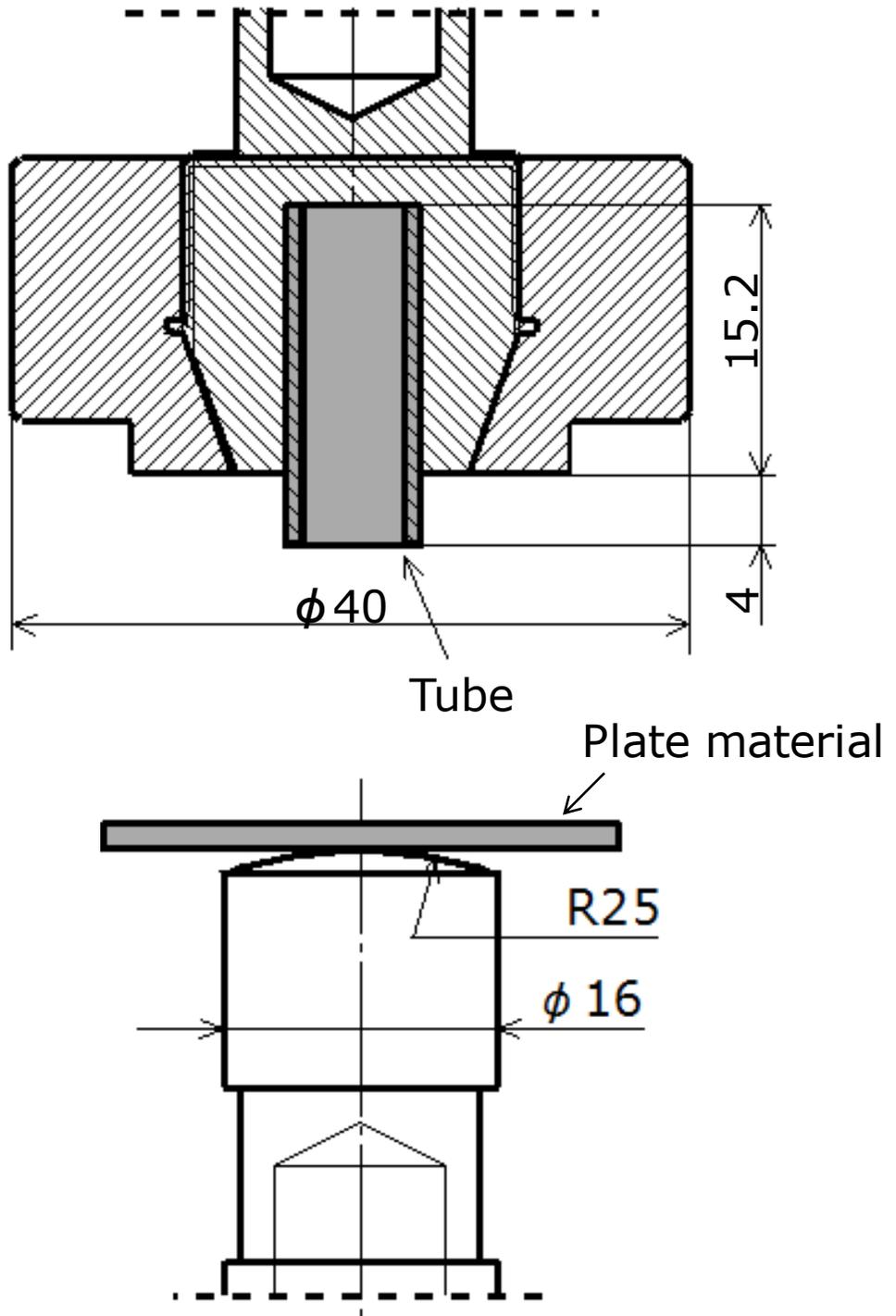


Fig.2-8 Schematic drawing of upper electrode and R type lower electrode

Determination area 40~60mm

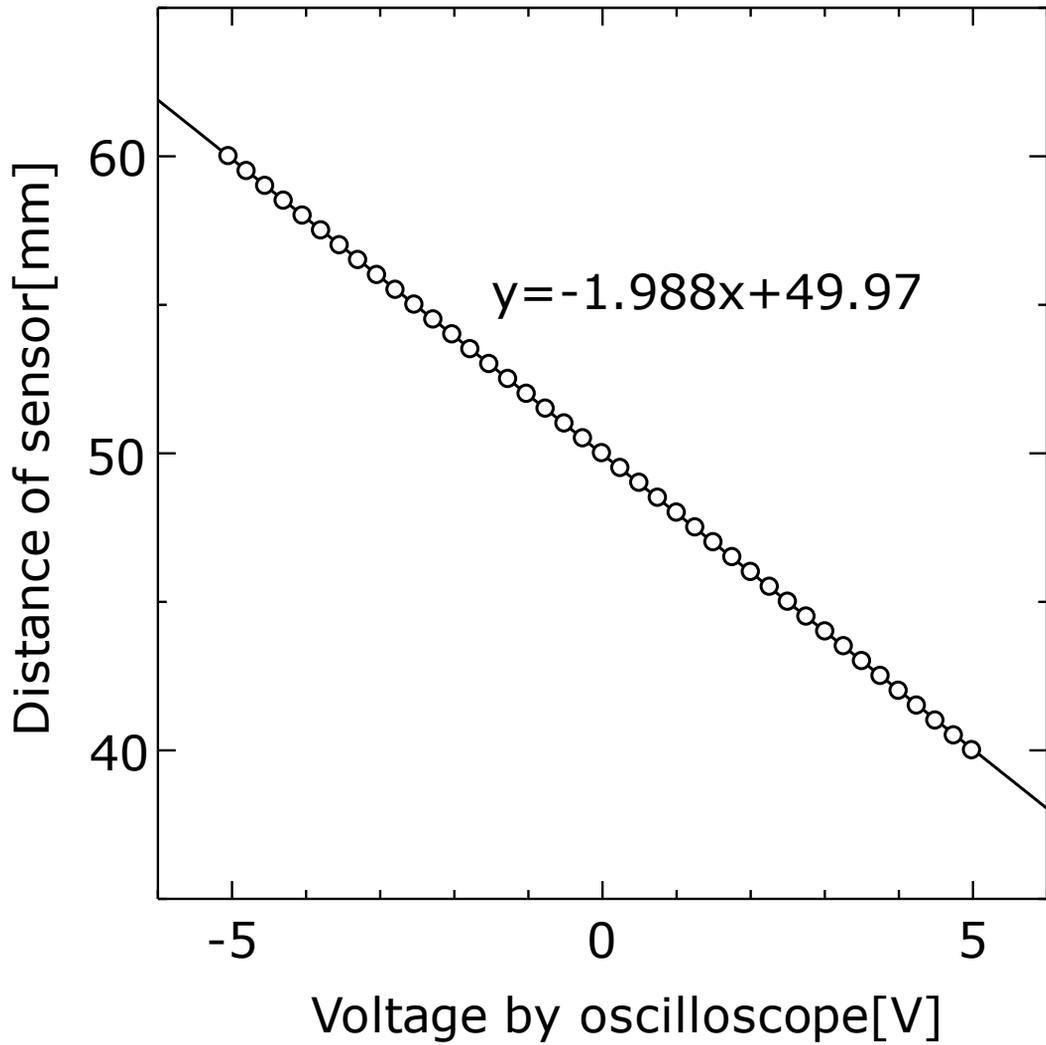


Fig.2-9 Relation between of voltage with oscilloscope and displacement sensor

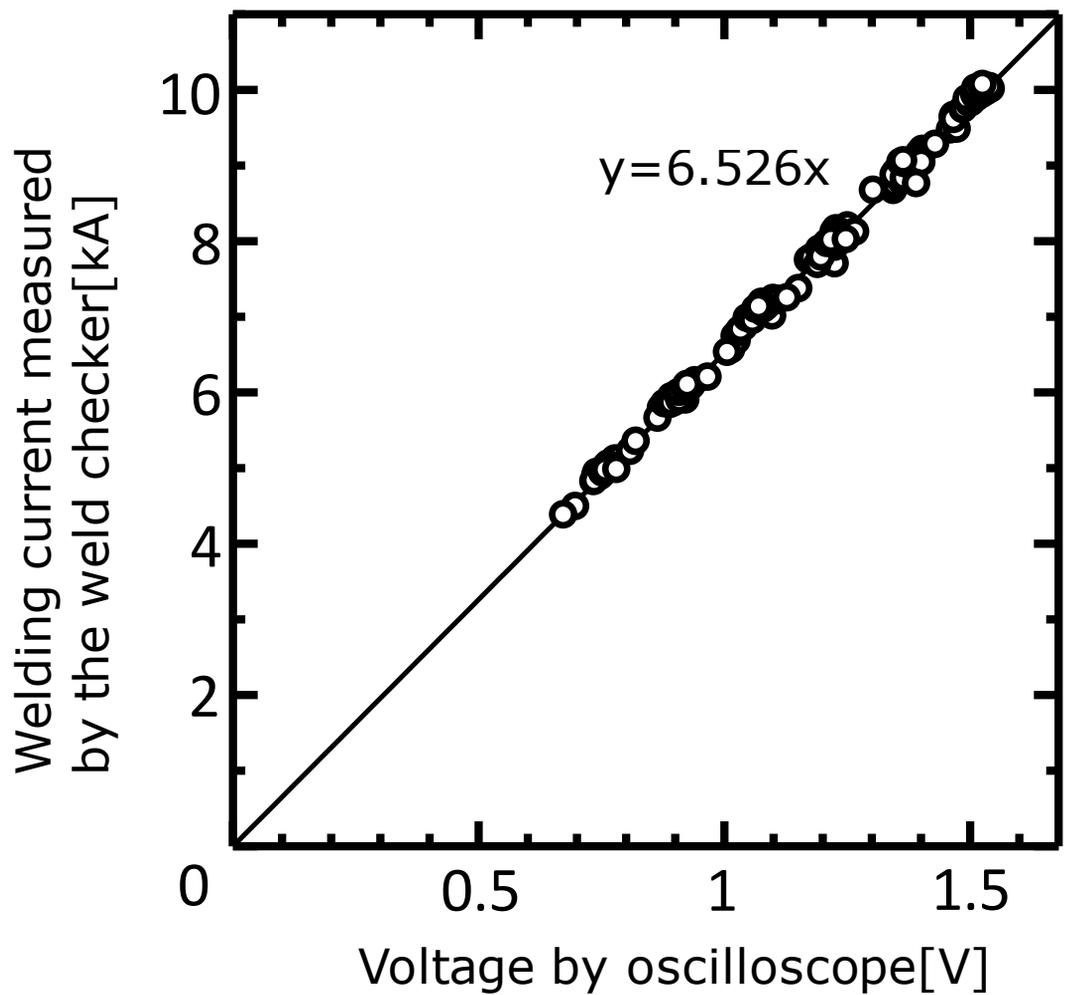


Fig.2-10 Effective value of welding current from welding checker and voltage value read by oscilloscope

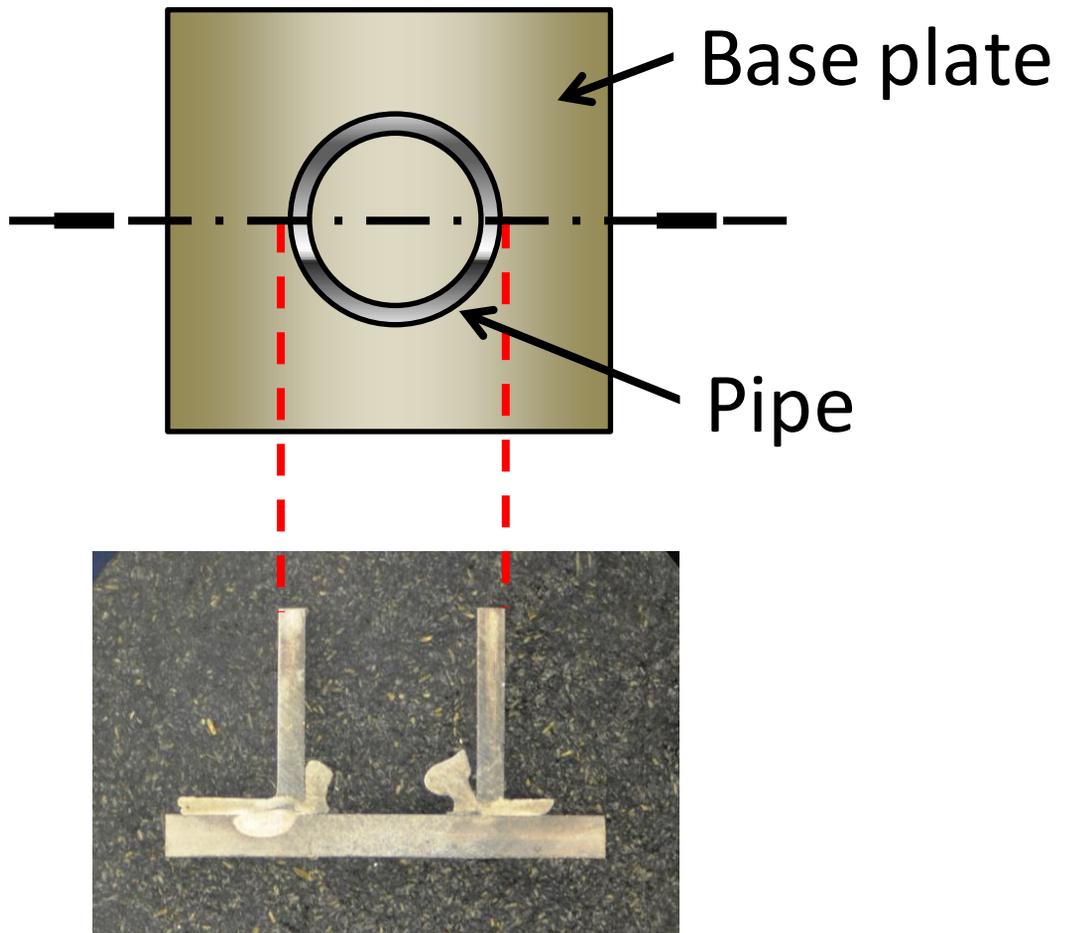
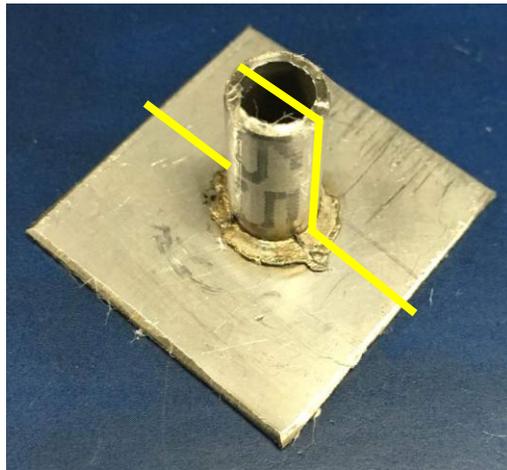


Fig.2-11 Specimen after welding and method of section observation

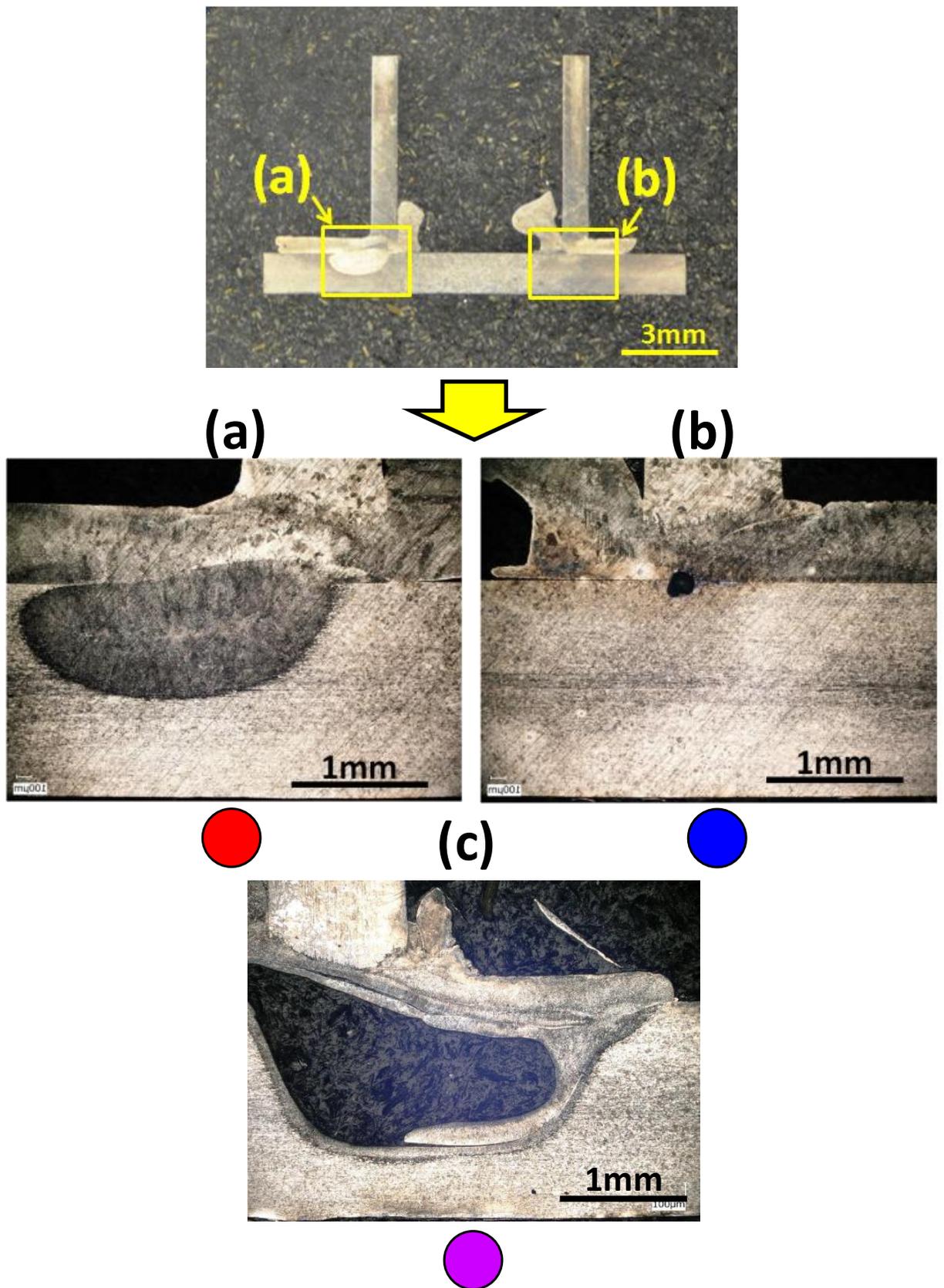


Fig.2-12 Method for evaluating melting of sheet material

		Welding time[cycle]					
		6	8	10	12	14	16
Force[kN]	3kN						
	2kN						
		8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9
		Welding current[kA]					

Fig.3-1 Section observation result using flat type as lower electrode

		Welding time[cycle]					
		6	8	10	12	14	16
Force[kN]	3kN						
	2kN						
		8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9
		Welding current[kA]					

Fig.3-2 Section observation result using R type as lower electrode(First time)

		Welding time[cycle]					
		6	8	10	12	14	16
Force[kN]	3kN						
	2kN						
		8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9
		Welding current[kA]					

Fig.3-3 Section observation result using R type as lower electrode(Second time)

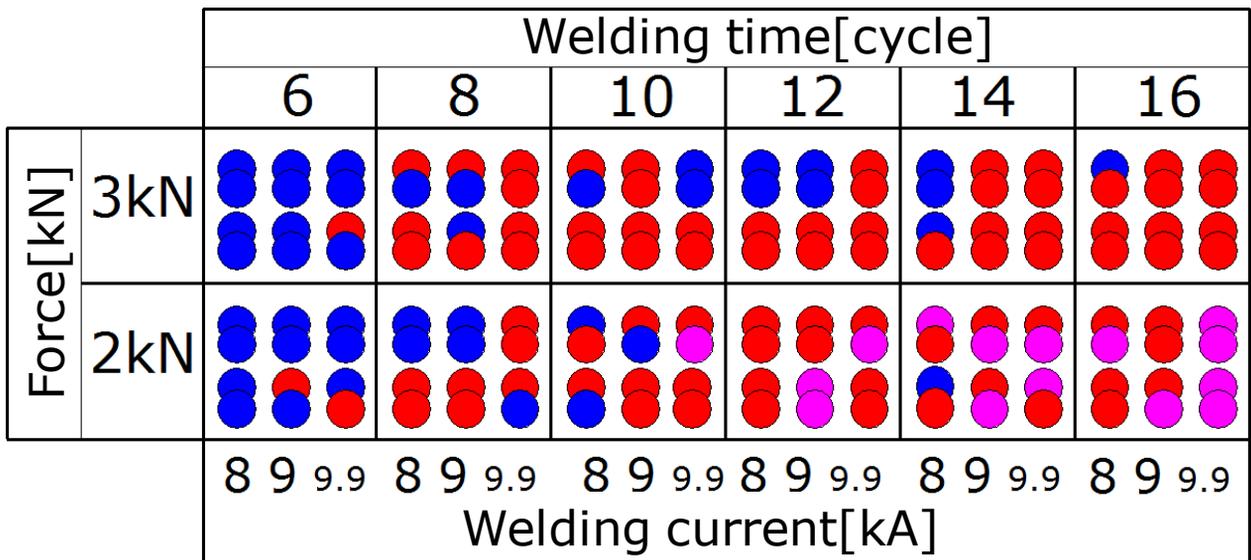


Fig.3-4 Section observation result using R type as lower electrode(First&Second time)

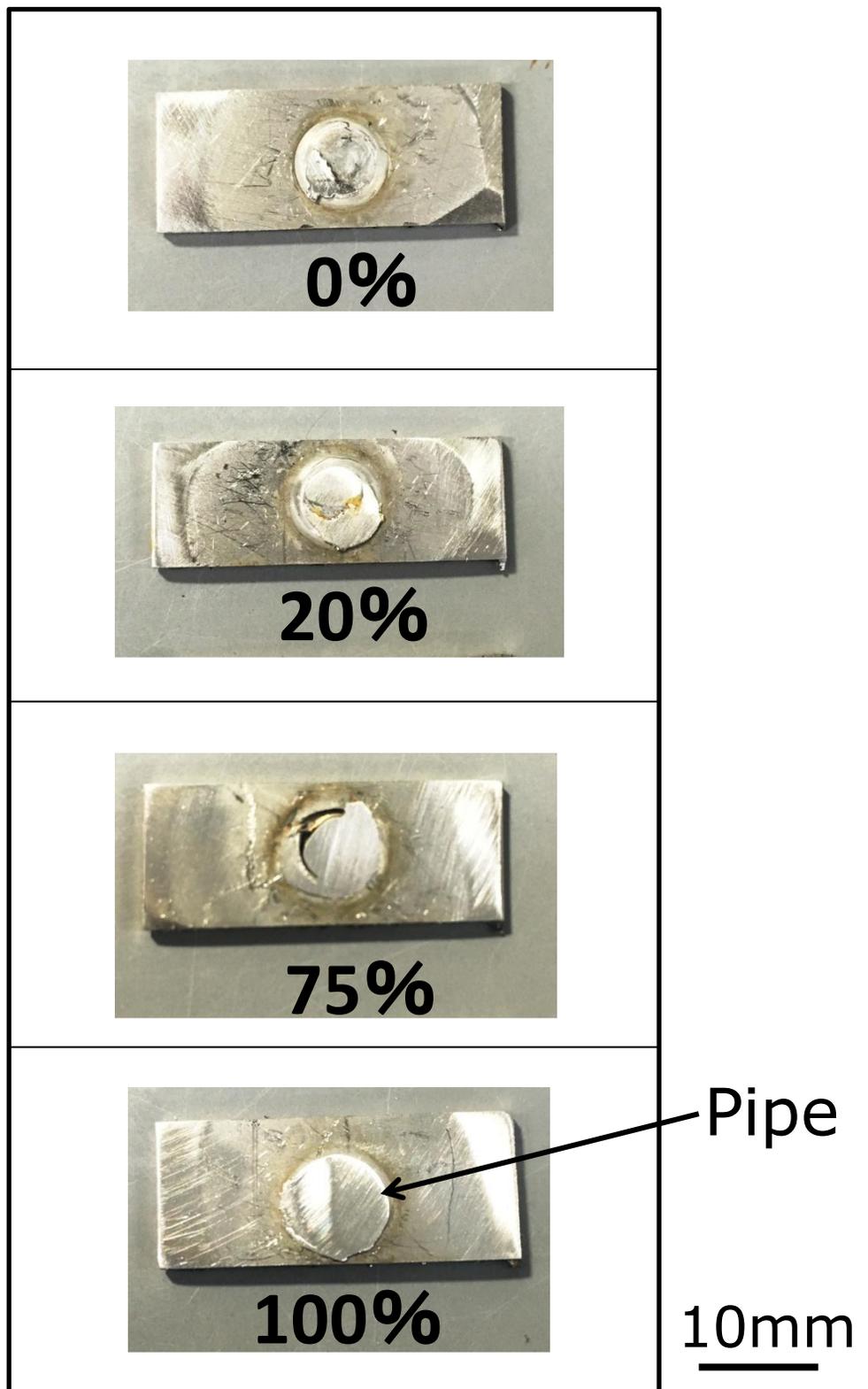
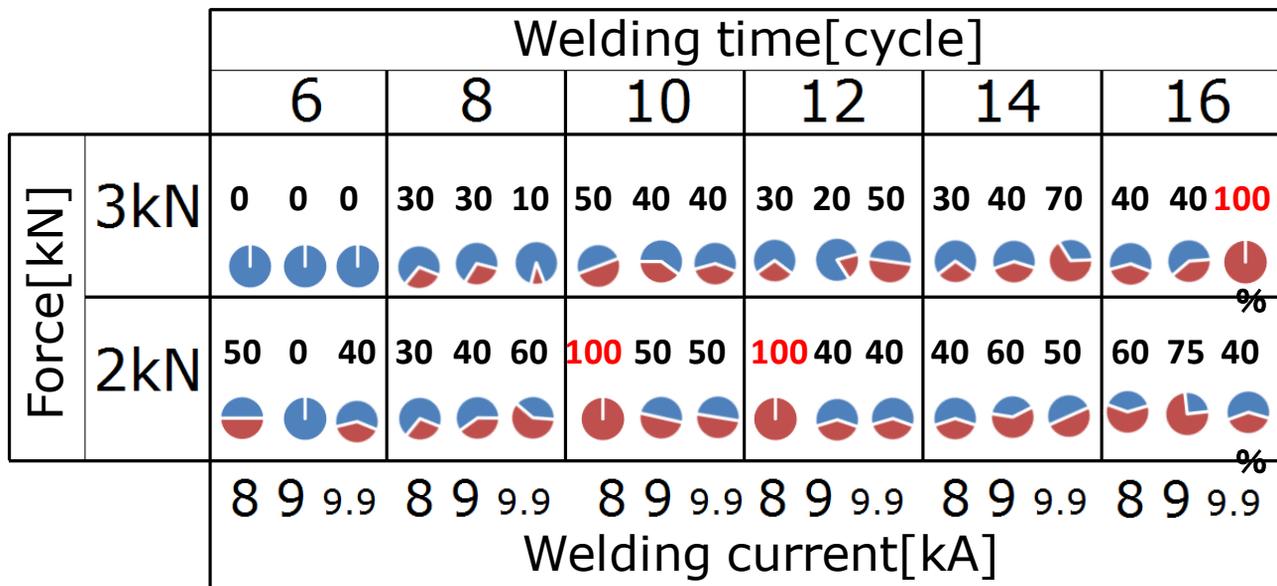
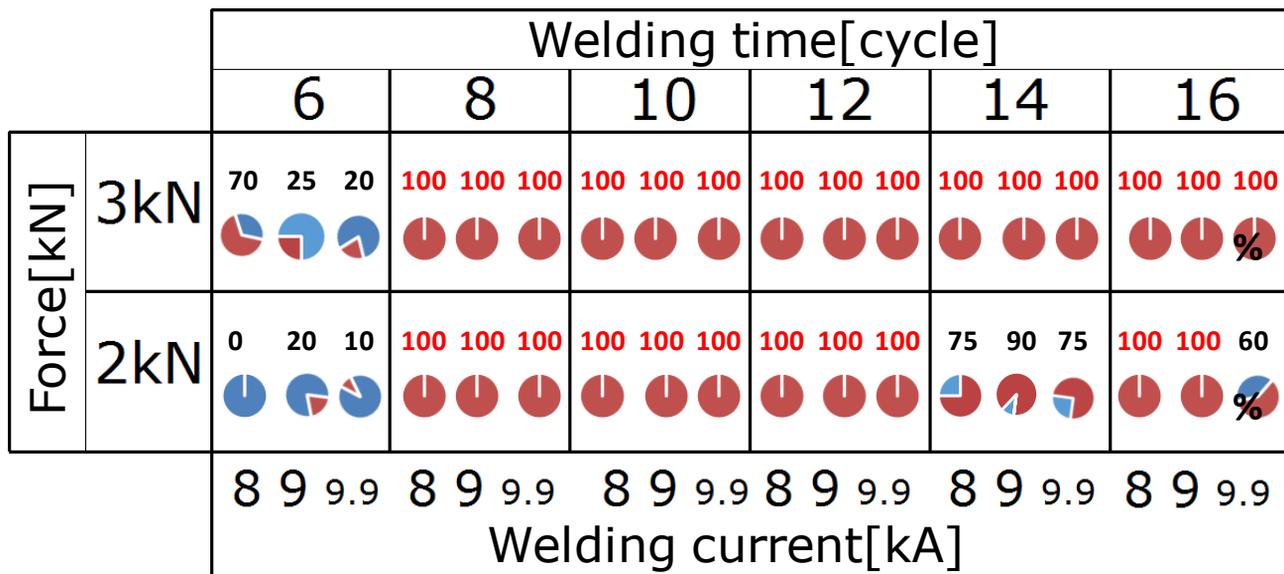


Fig.3-5 Example of joining ratio

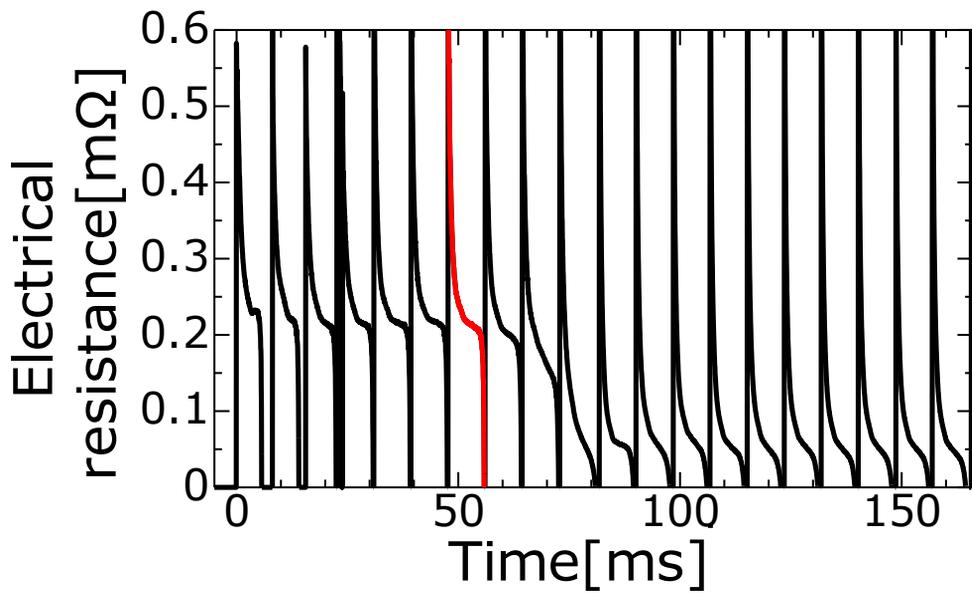


(a) Flat type



(b) R type

Fig.3-6 Graph that summarizes the joining ratio



Enlarged view

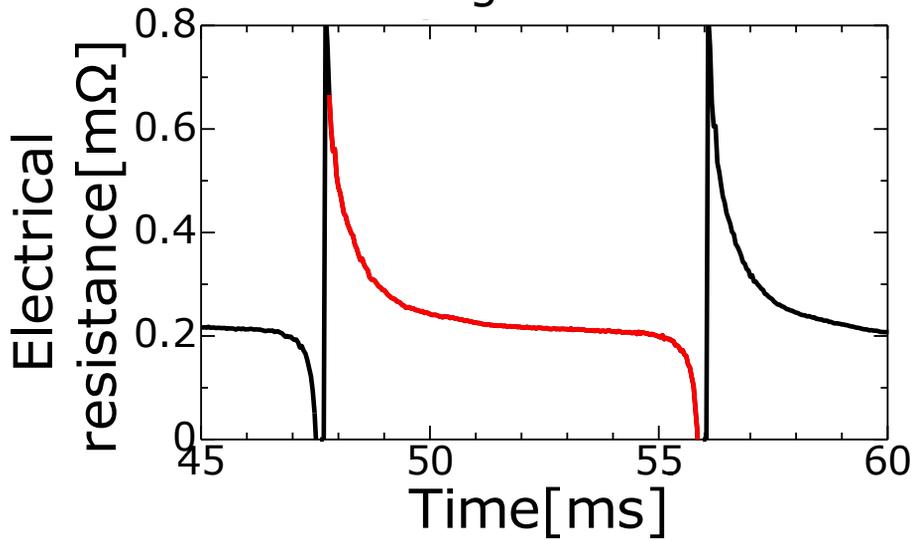


Fig.3-7 Example of an enlarged view of electric resistance during welding

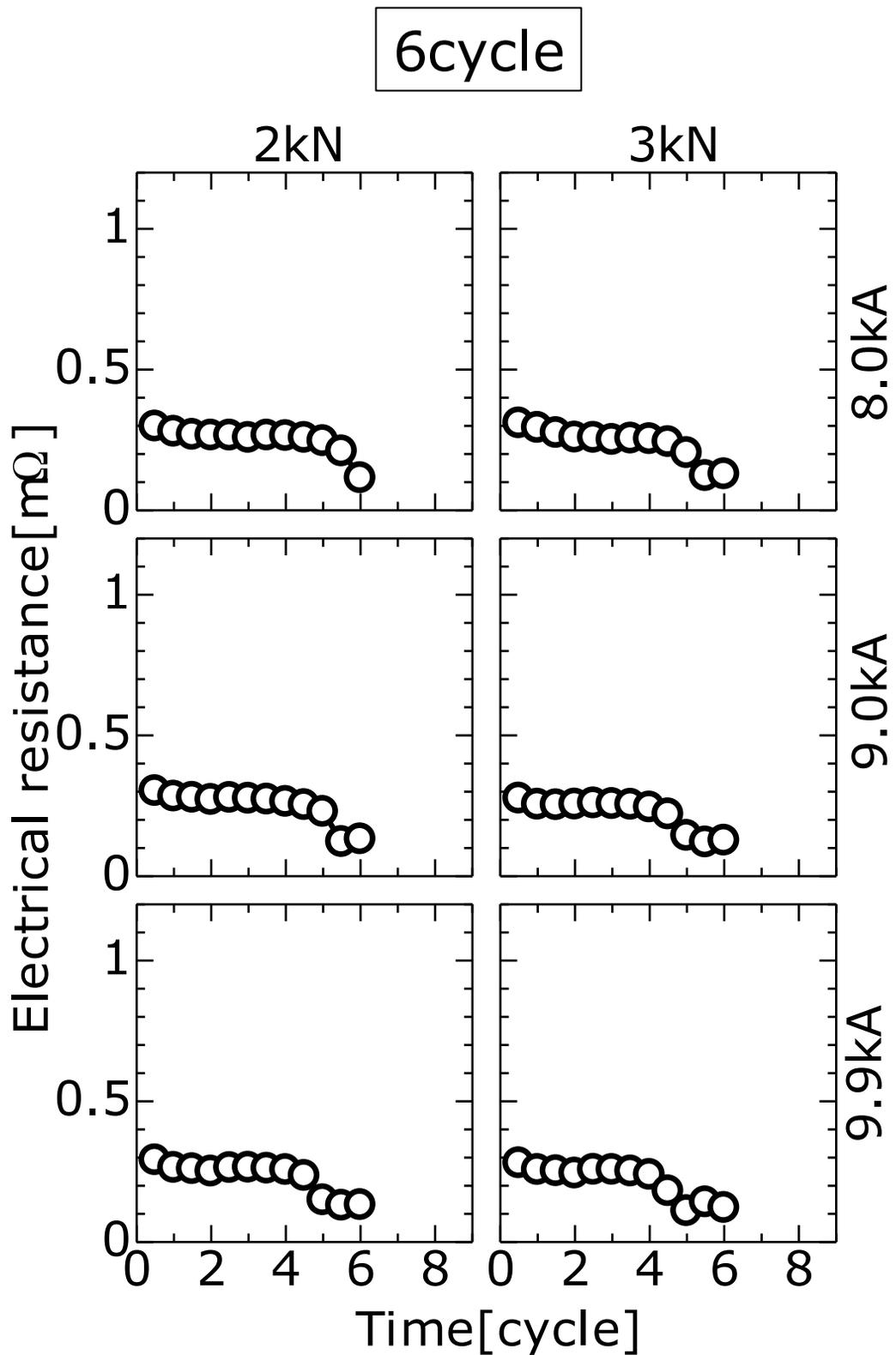


Fig.3-8(a) Electric resistance at 6 cycle of welding time using flat type(First time)

8cycle

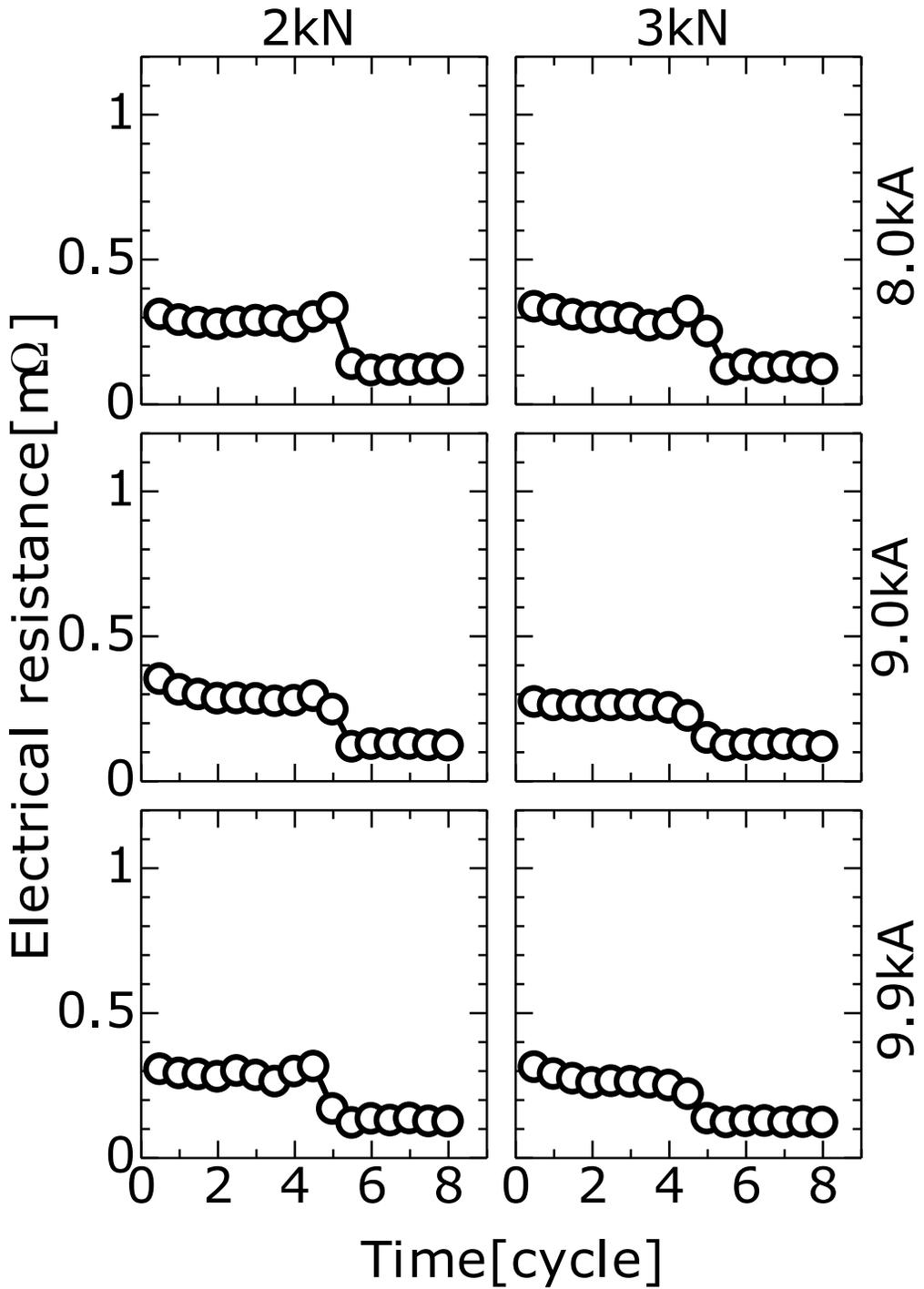


Fig.3-8(b) Electric resistance at 8 cycle of welding time using flat type(First time)

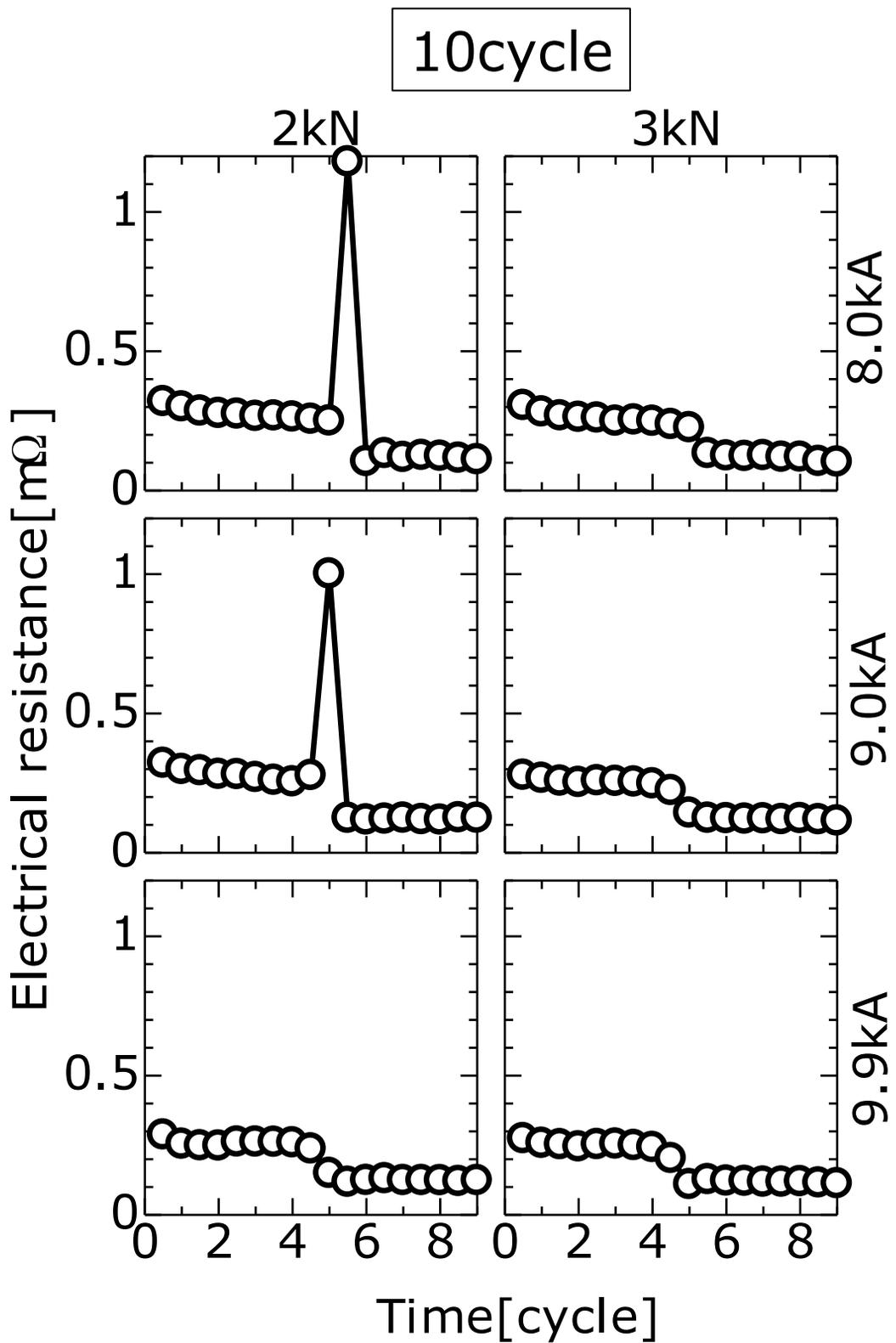


Fig.3-8(c) Electric resistance at 10 cycle of welding time using flat type(First time)

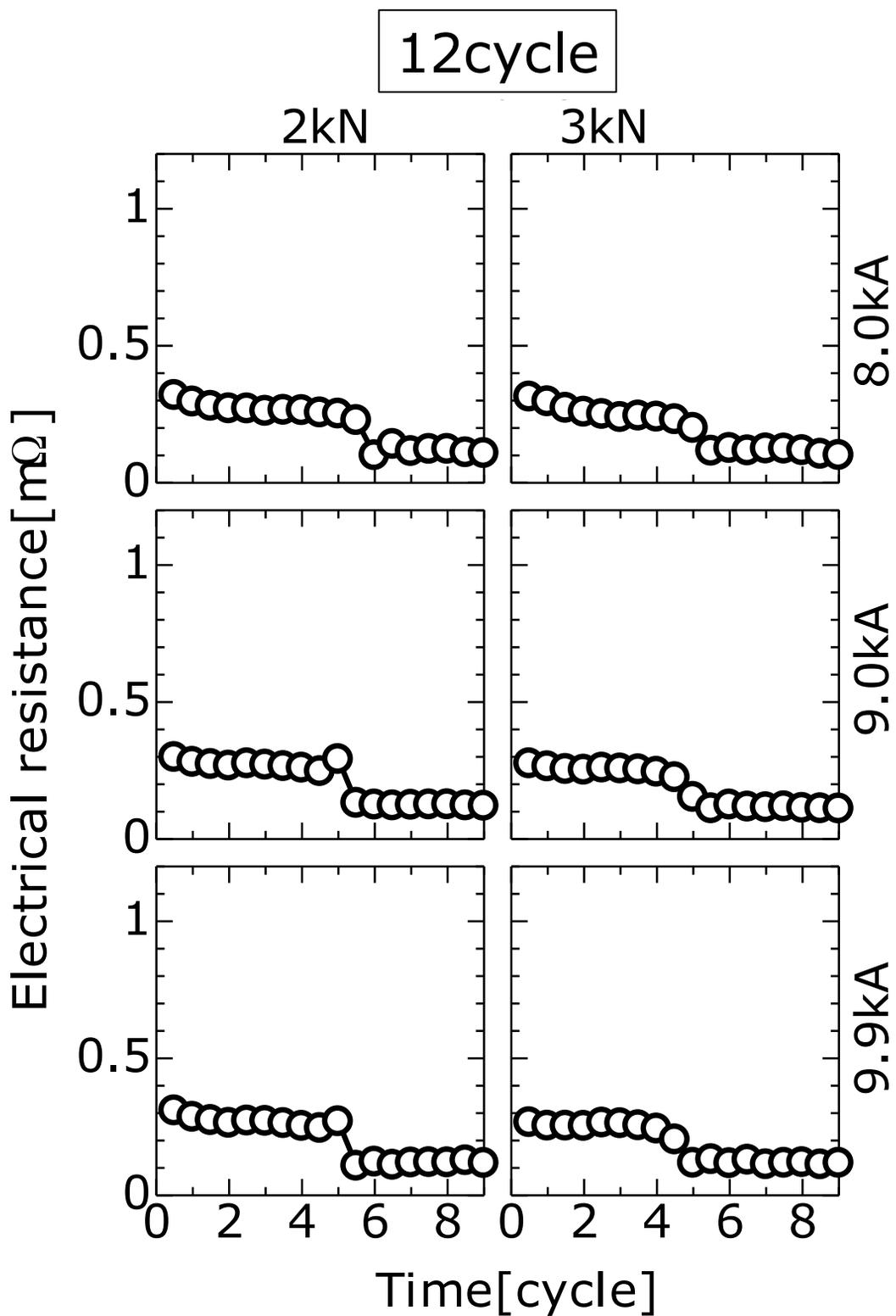


Fig.3-8(d) Electric resistance at 12 cycle of welding time using flat type(First time)

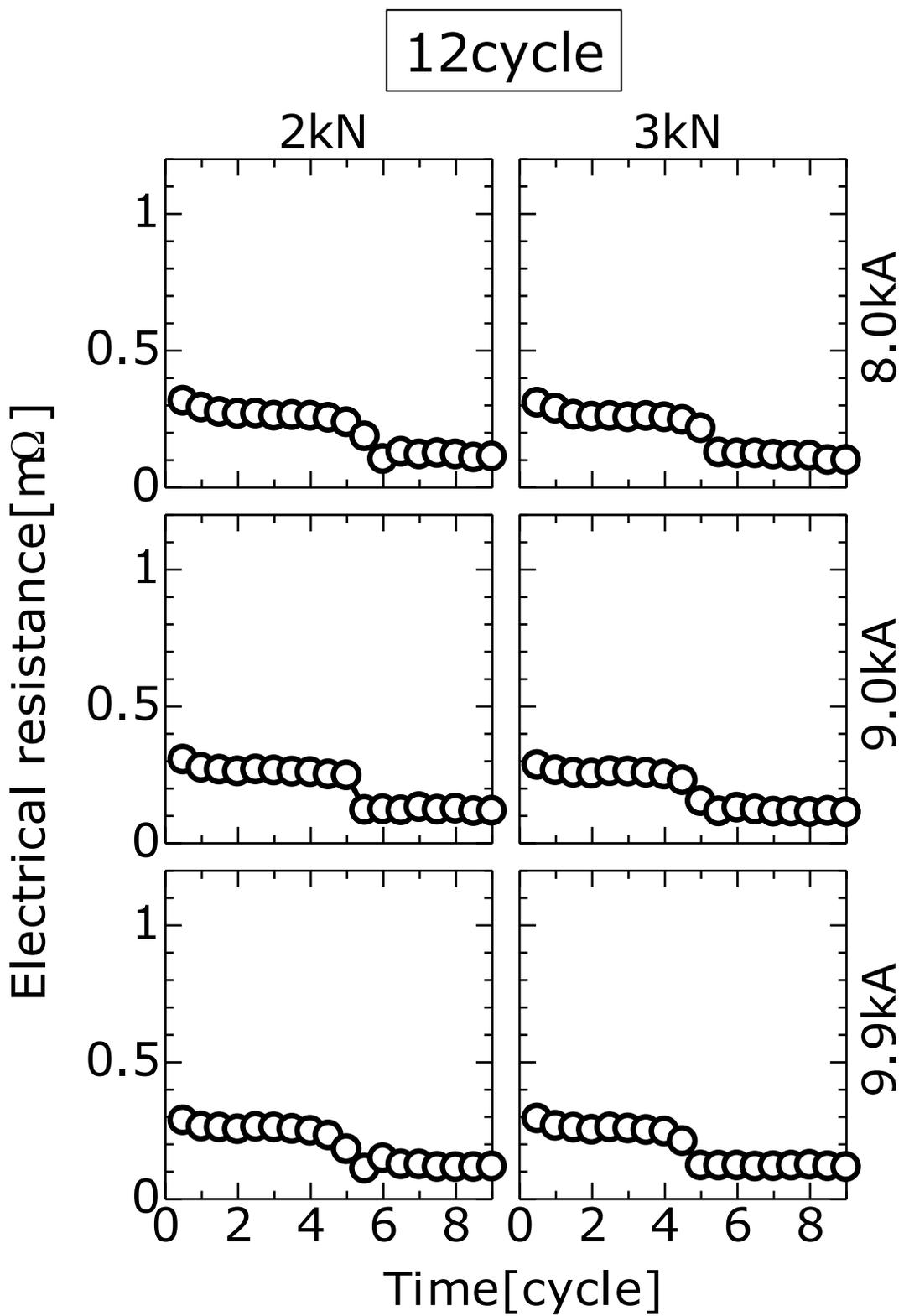


Fig.3-8(e) Electric resistance at 14 cycle of welding time using flat type(First time)

16cycle

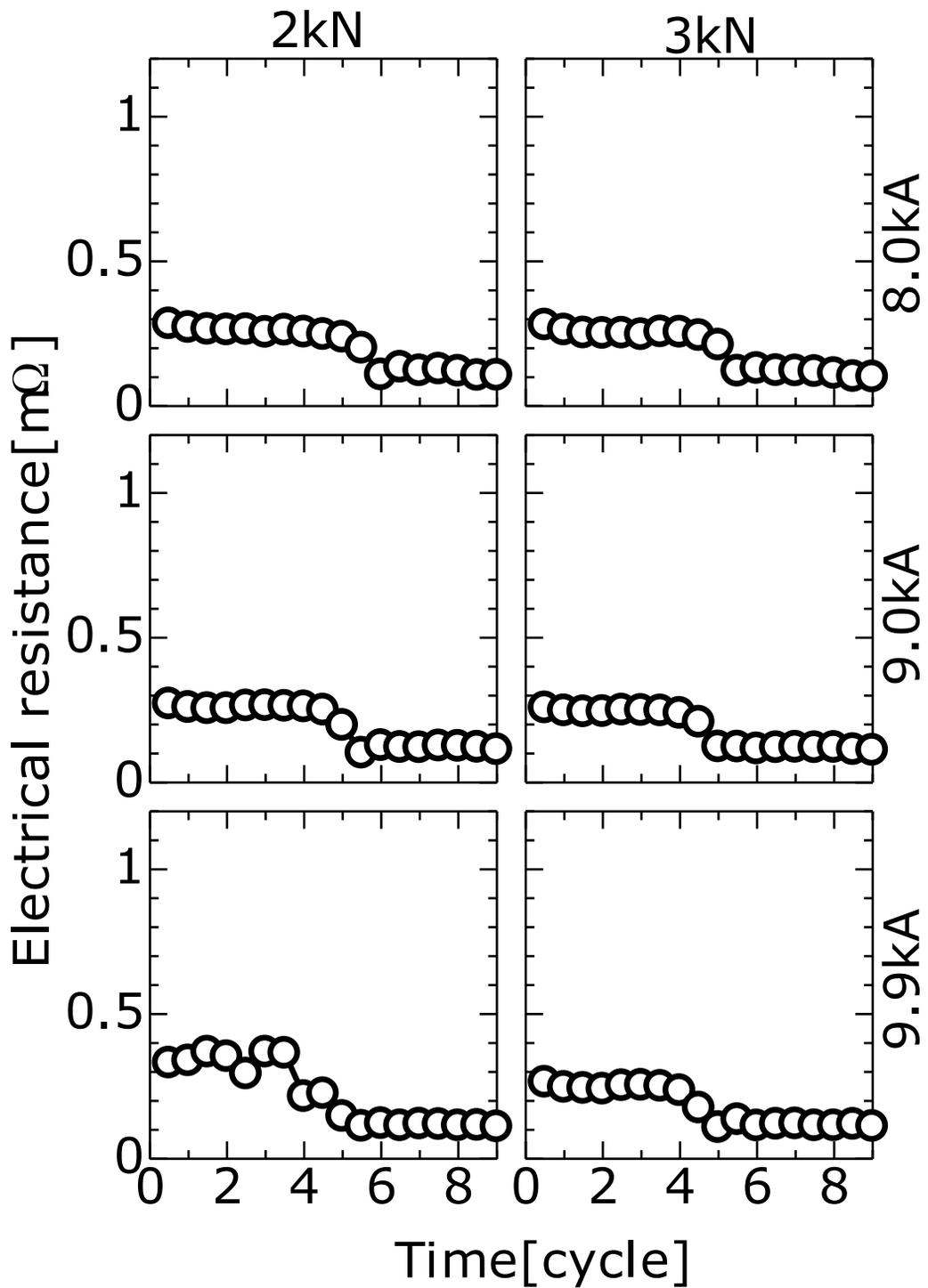


Fig.3-8(f) Electric resistance at 16 cycle of welding time using flat type(First time)

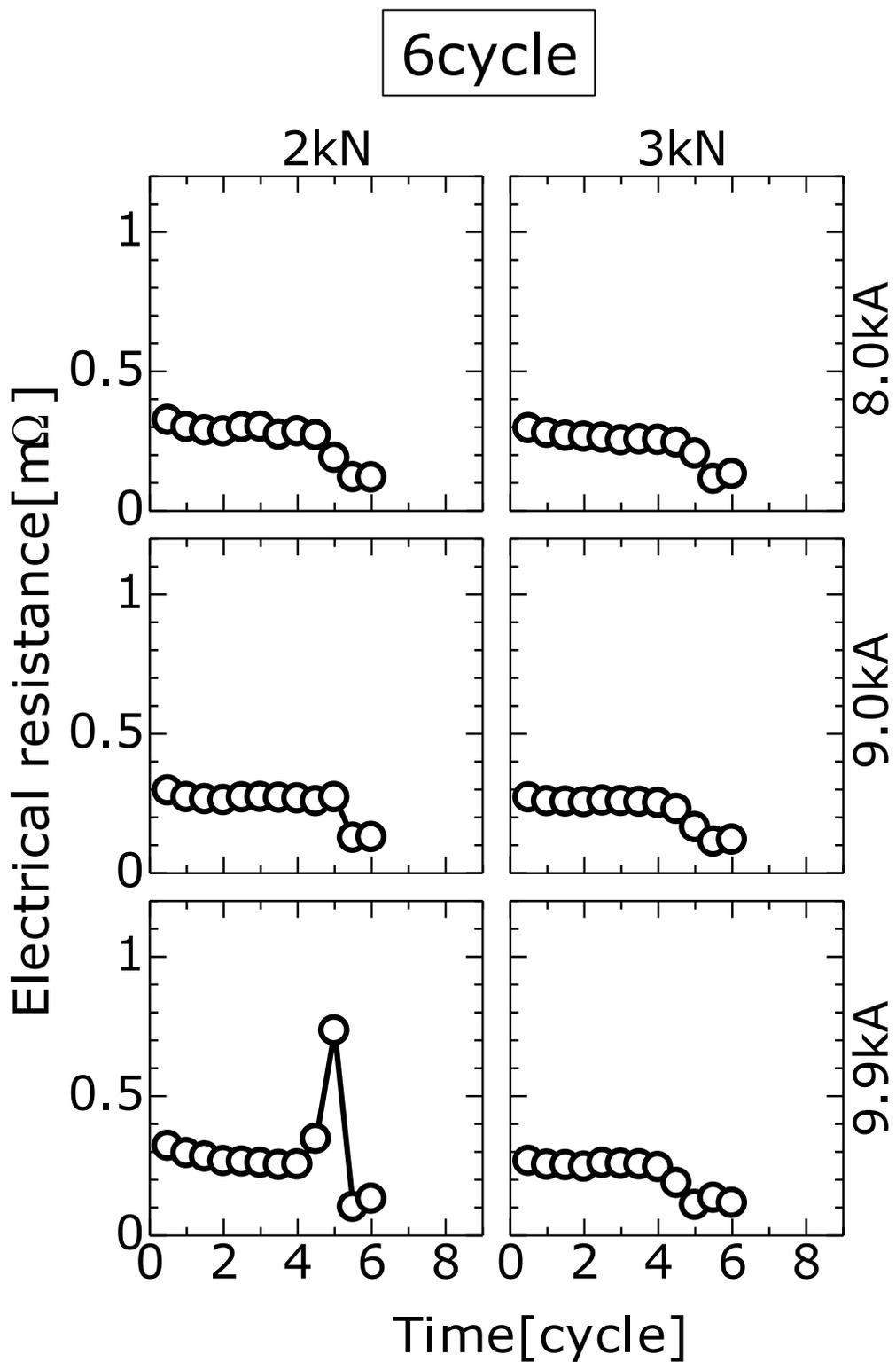


Fig.3-9(a) Electric resistance at 6 cycle of welding time using flat type(Second time)

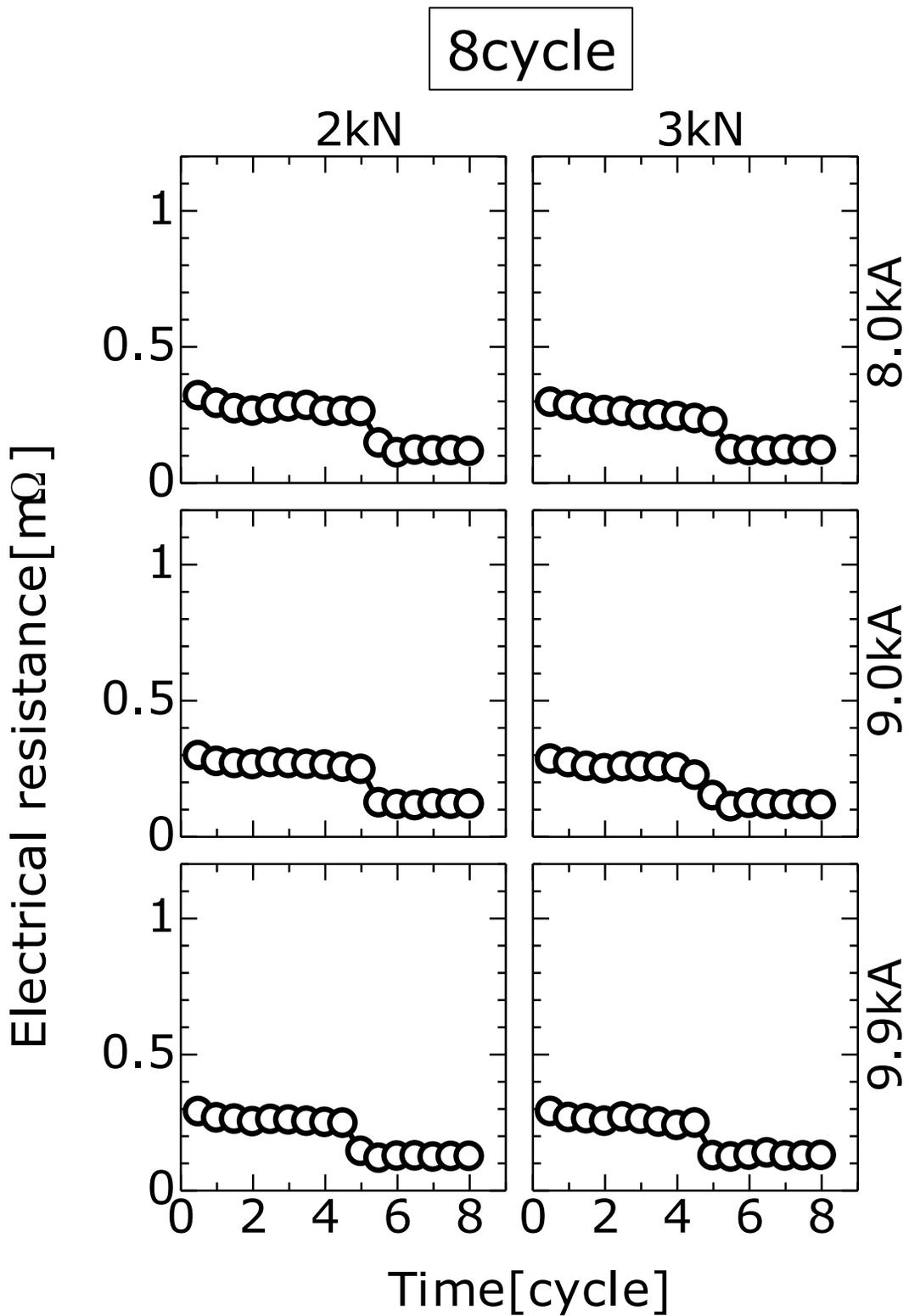


Fig.3-9(b) Electric resistance at 8 cycle of welding time using flat type(Second time)

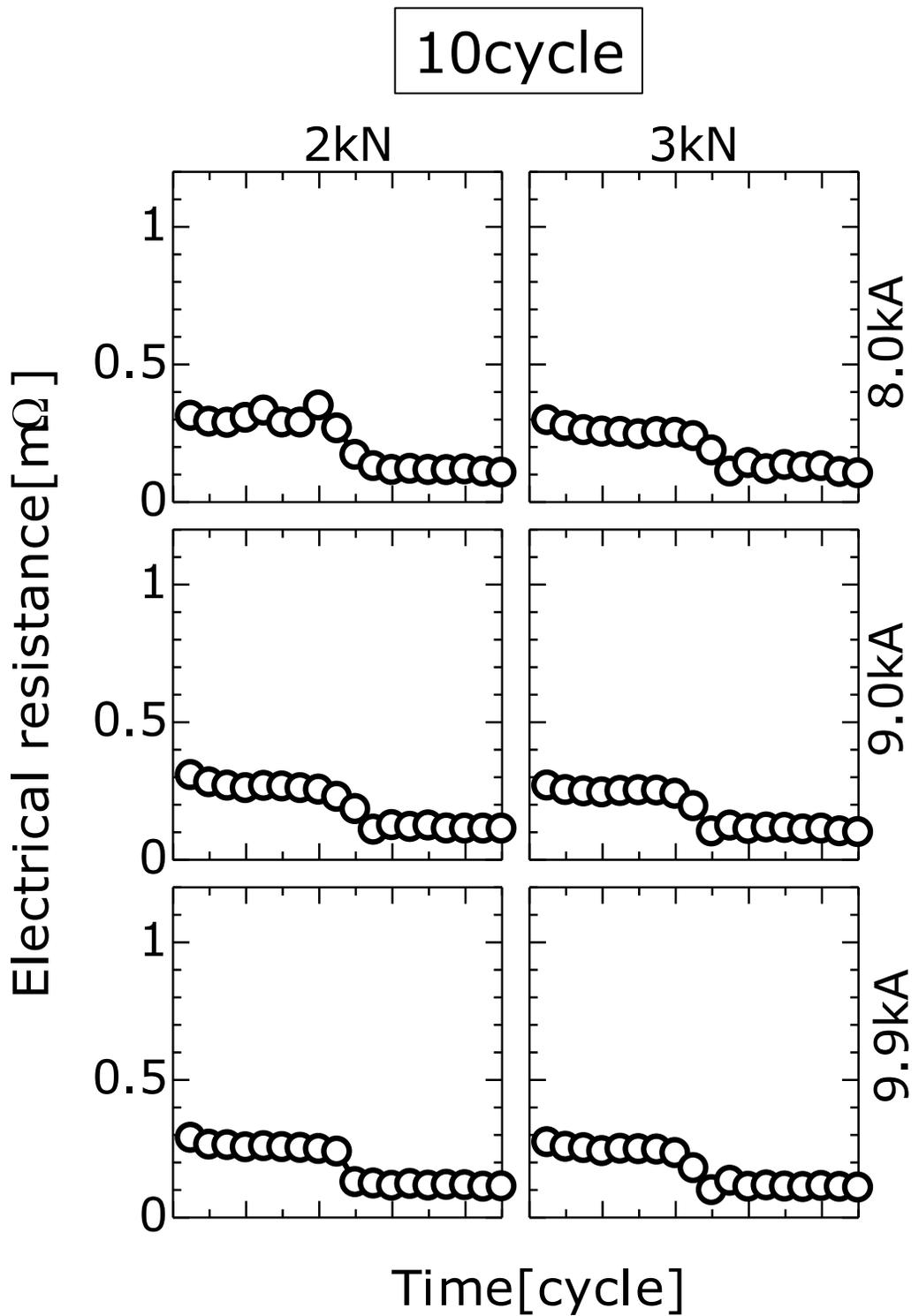


Fig.3-9(c) Electric resistance at 10 cycle of welding time using flat type(Second time)

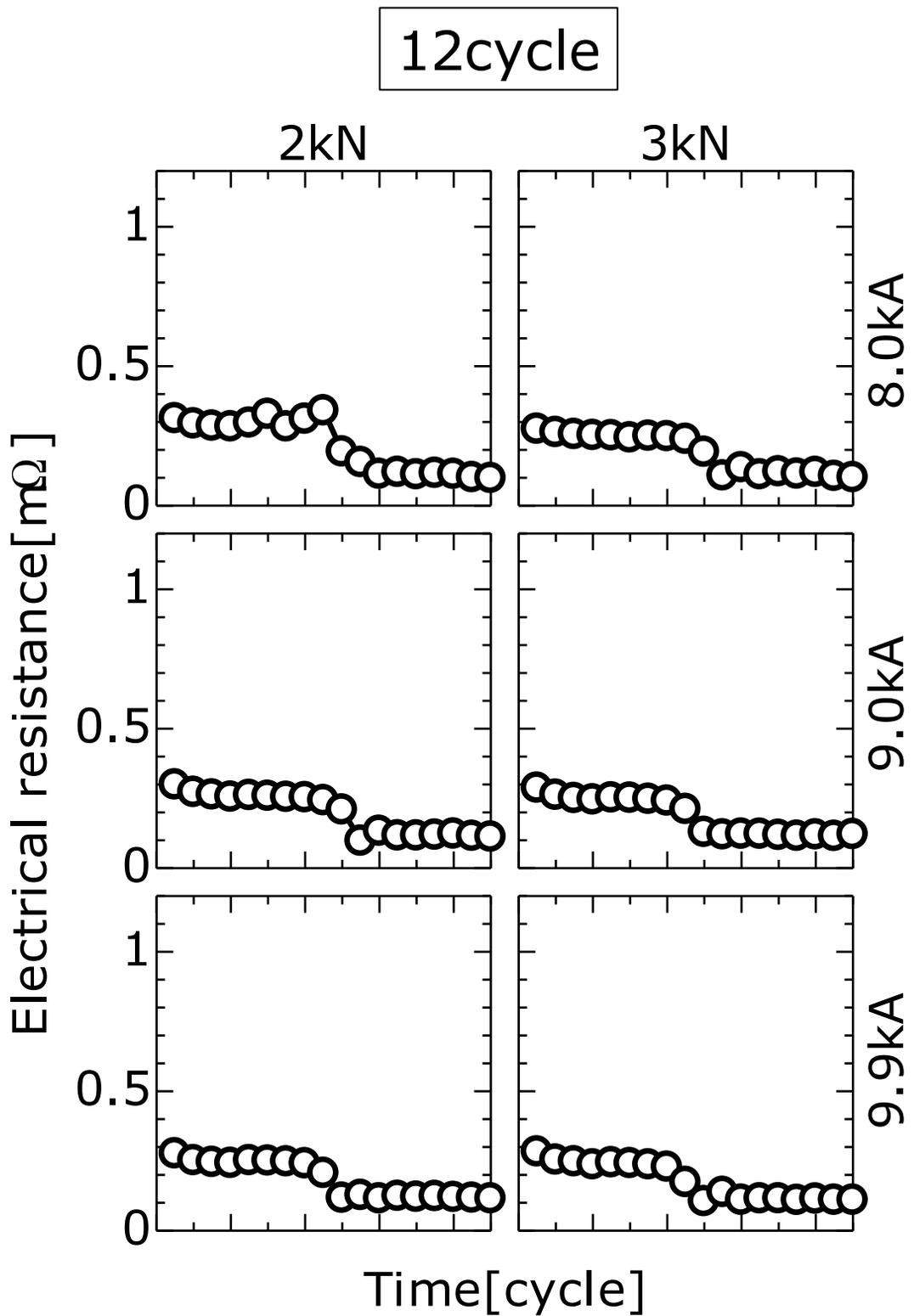


Fig.3-9(d) Electric resistance at 12 cycle of welding time using flat type(Second time)

14cycle

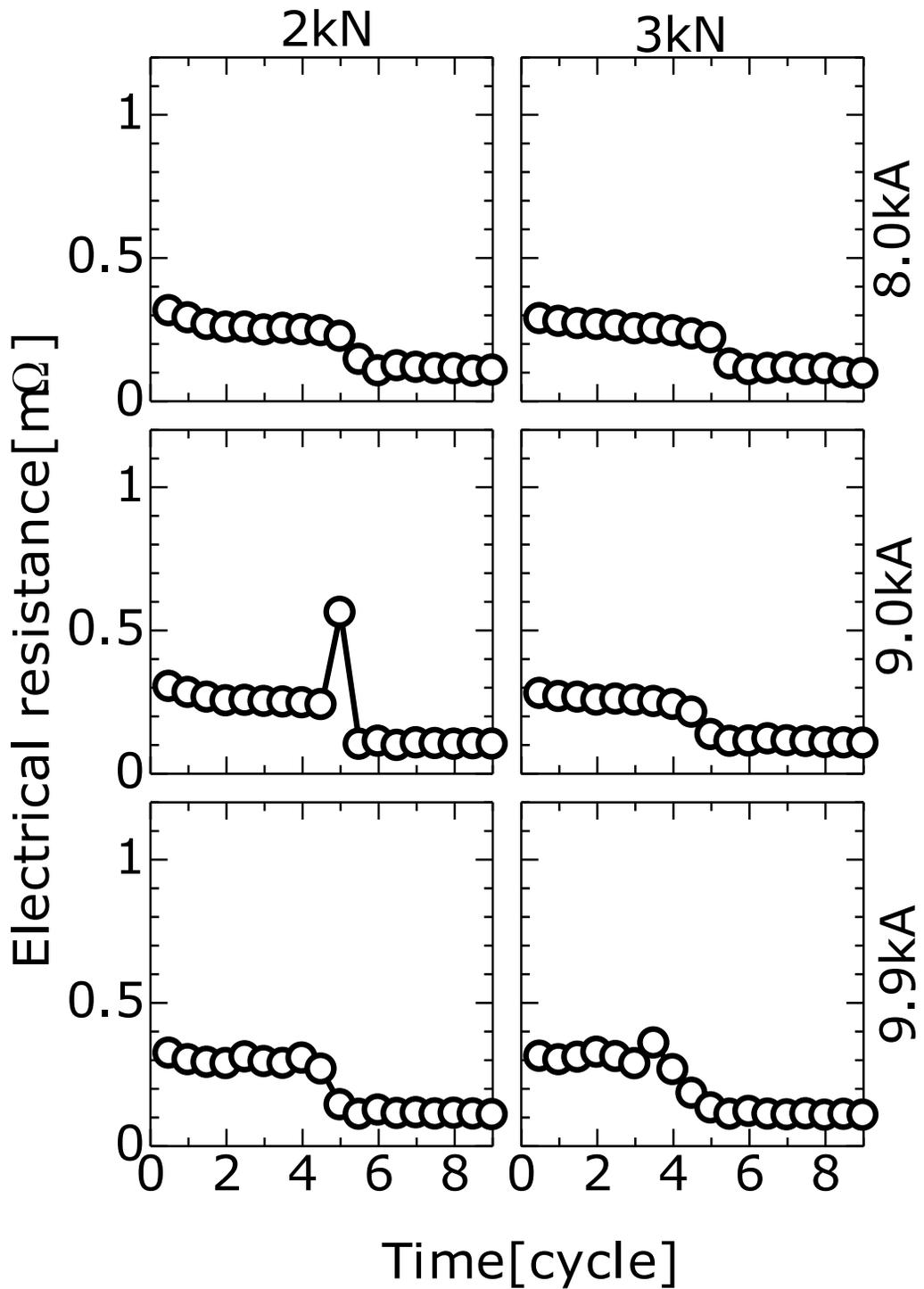


Fig.3-9(e) Electric resistance at 14 cycle of welding time using flat type(Second time)

16cycle

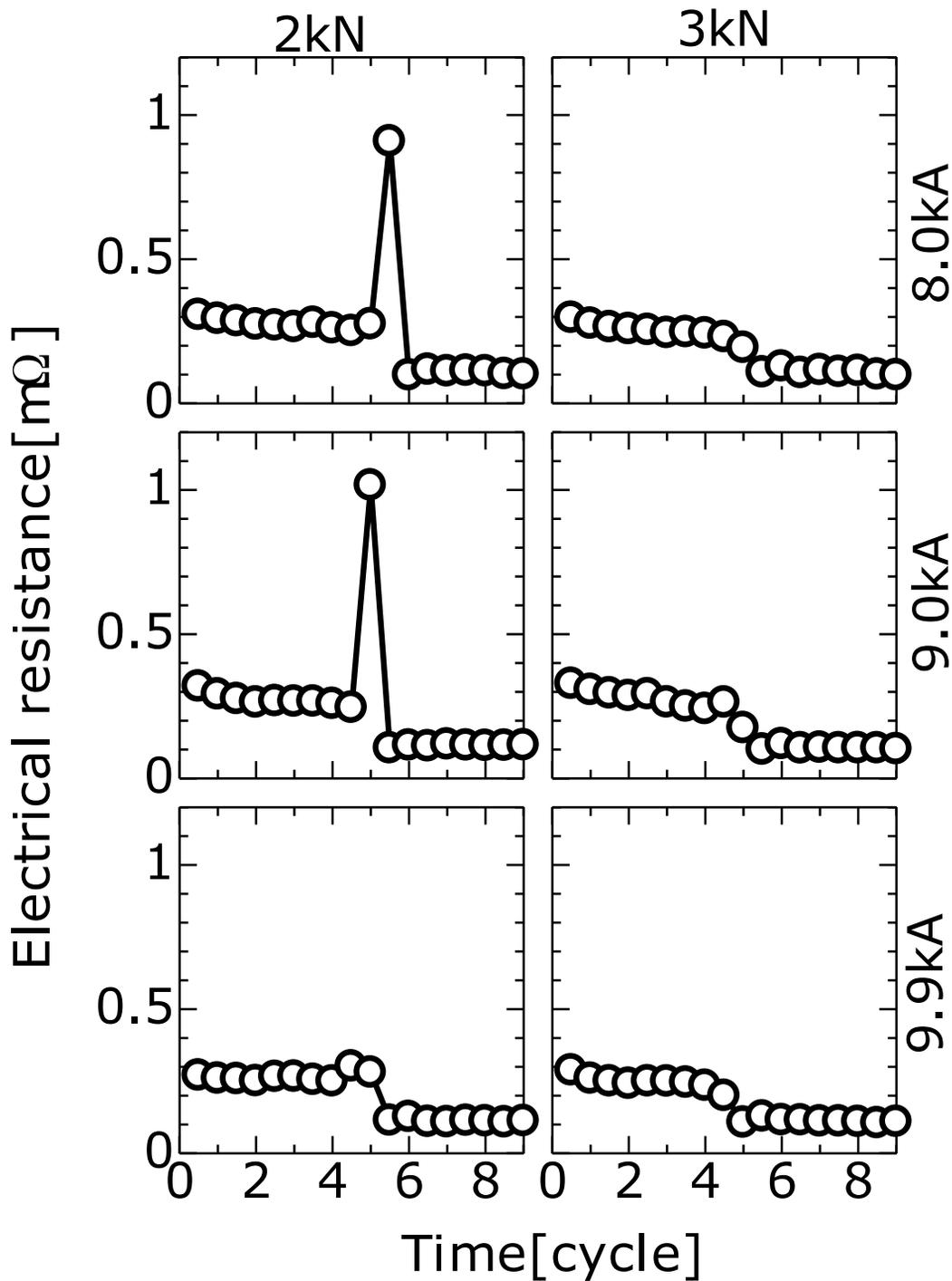


Fig.3-9(f) Electric resistance at 16 cycle of welding time using flat type(Second time)

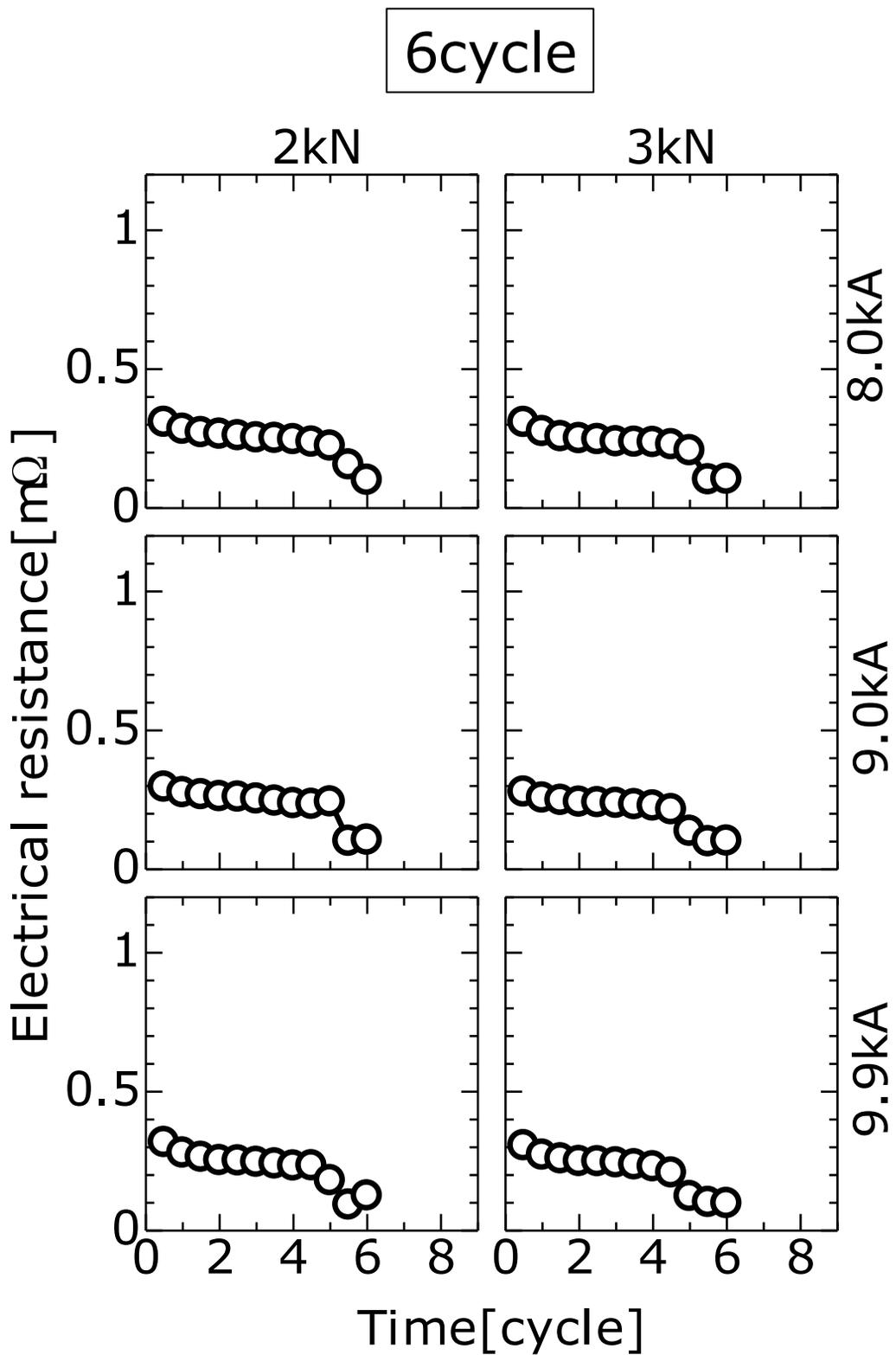


Fig.3-10(a) Electric resistance at 6 cycle of welding time using R type

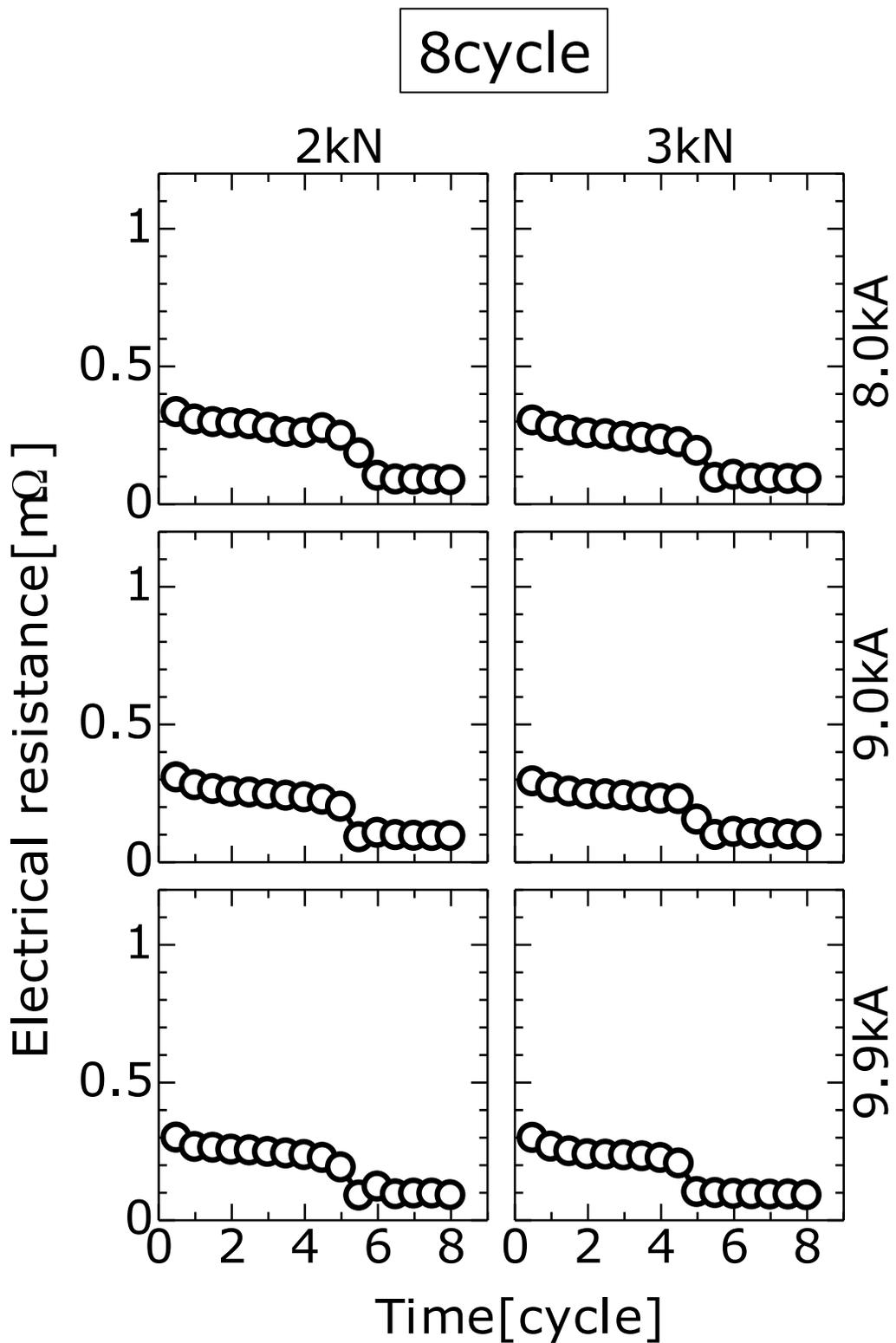


Fig.3-10(b) Electric resistance at 8 cycle of welding time using R type

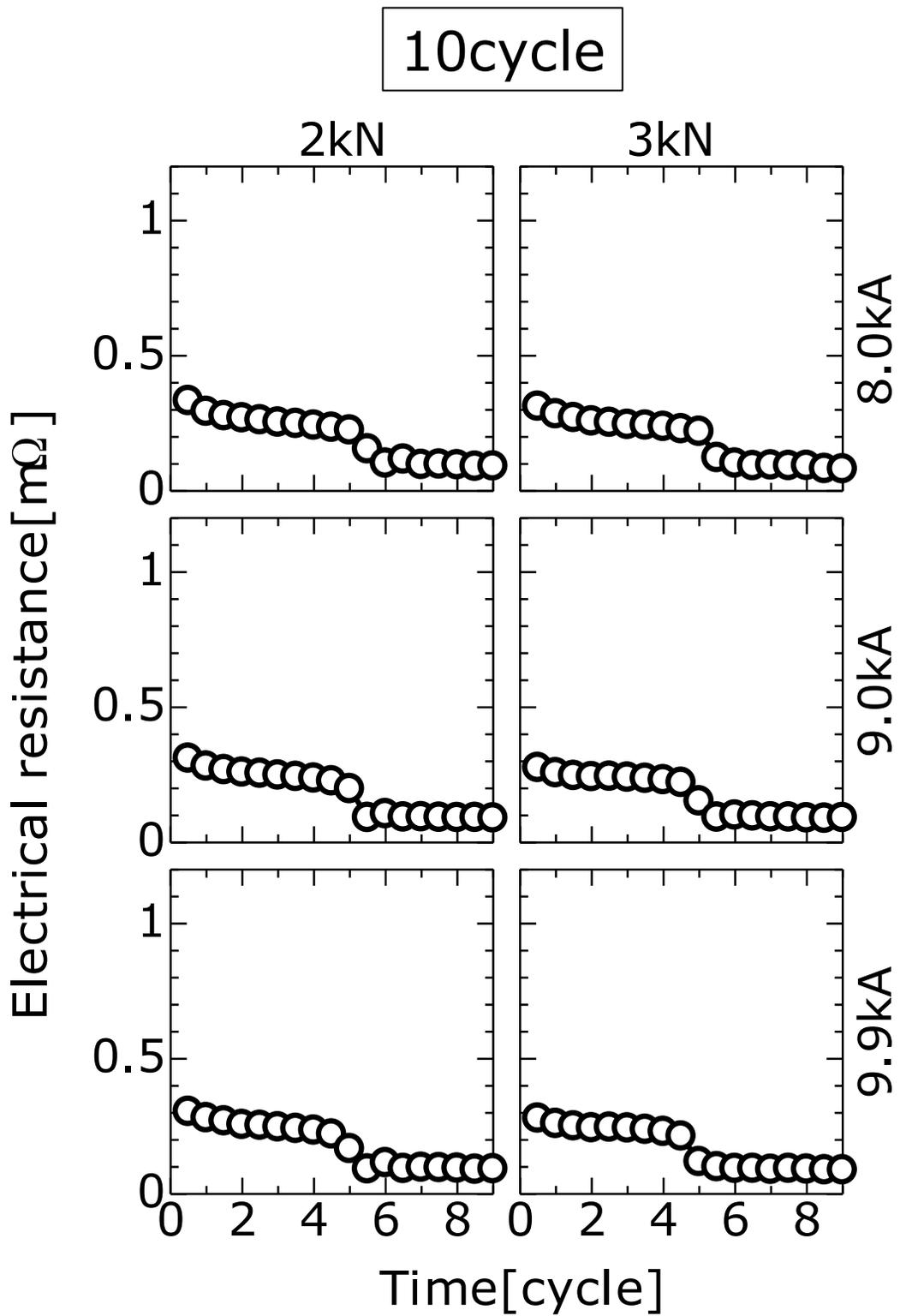


Fig.3-10(c) Electric resistance at 10 cycle of welding time using R type

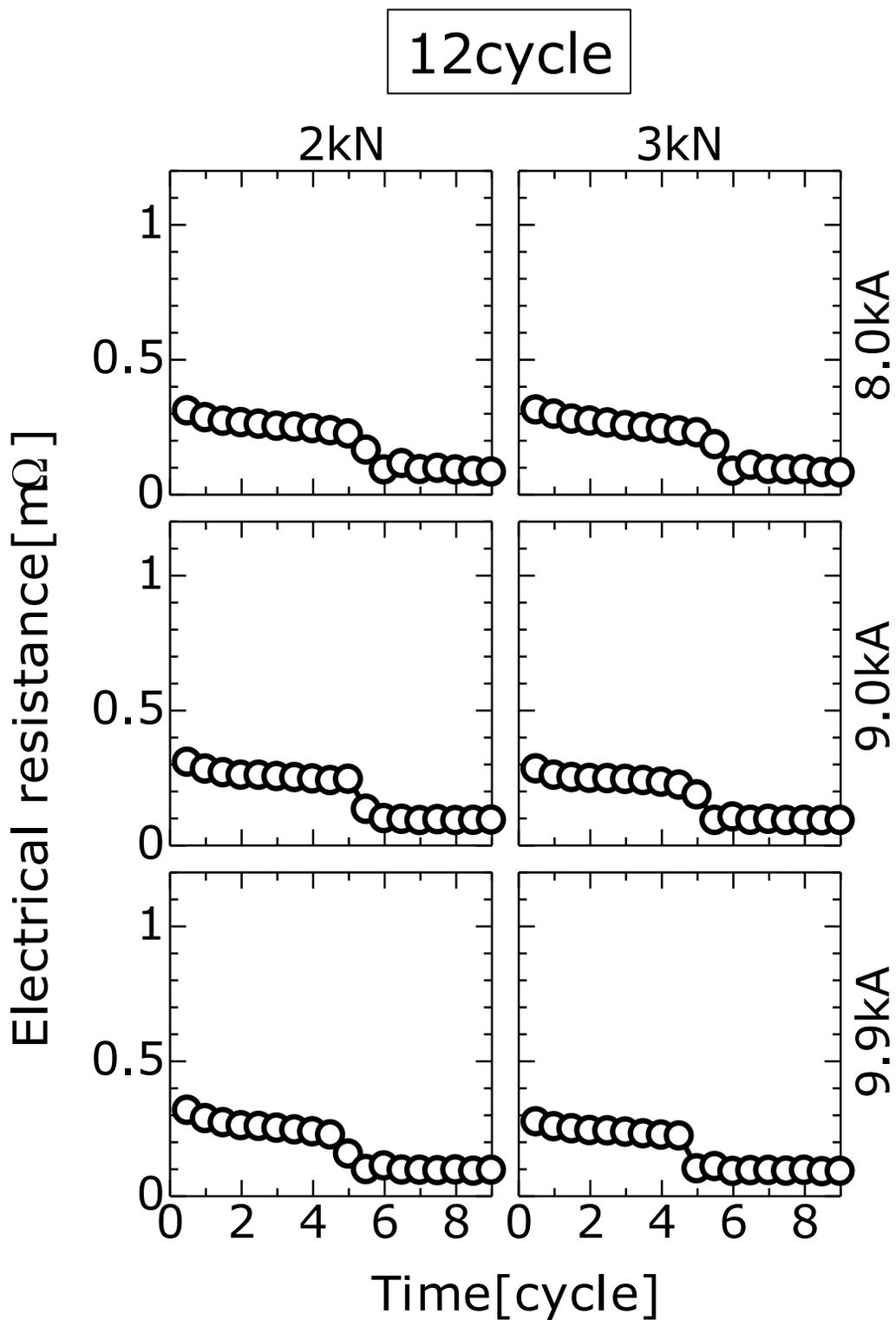


Fig.3-10(d) Electric resistance at 12 cycle of welding time using R type

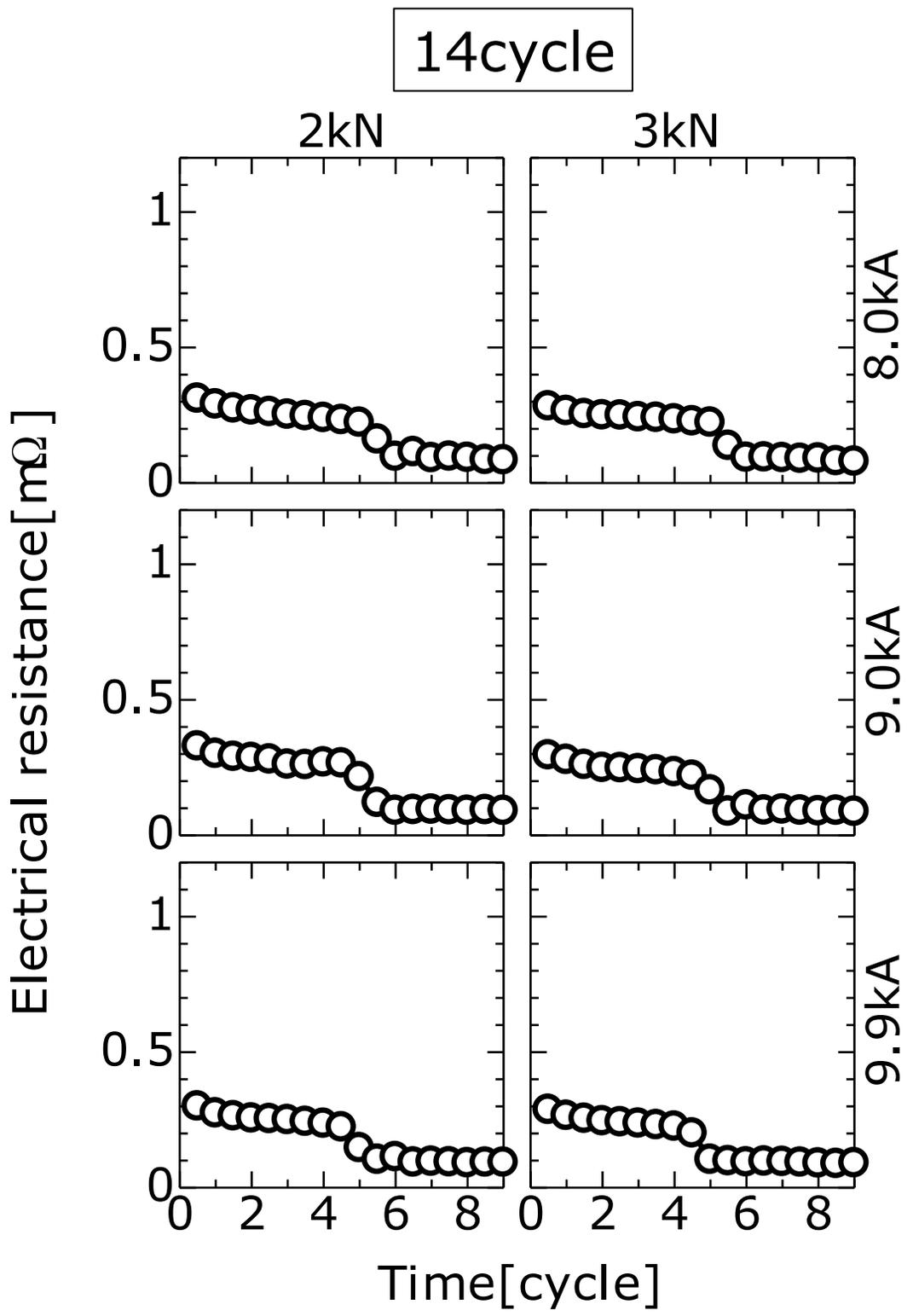


Fig.3-10(e) Electric resistance at 14 cycle of welding time using R type

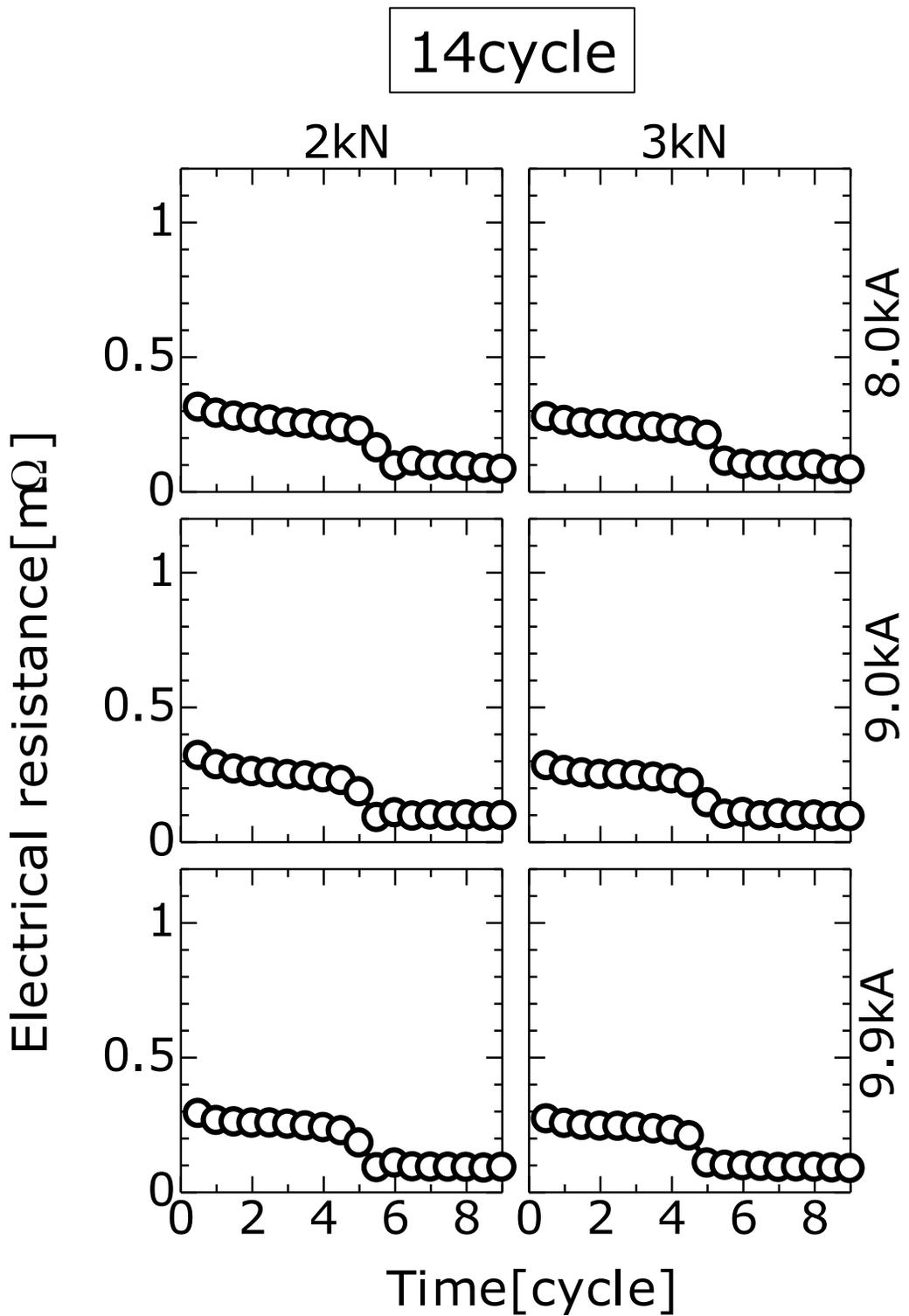


Fig.3-10(f) Electric resistance at 16 cycle of welding time using R type

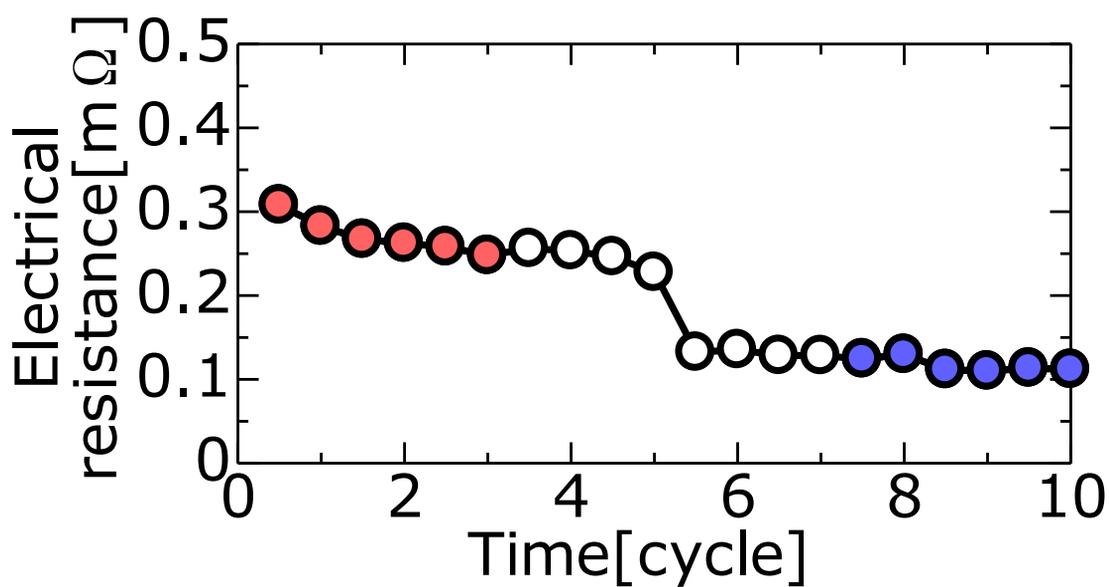


Fig.3-11 Example of electric resistance representing initial and final stage of welding

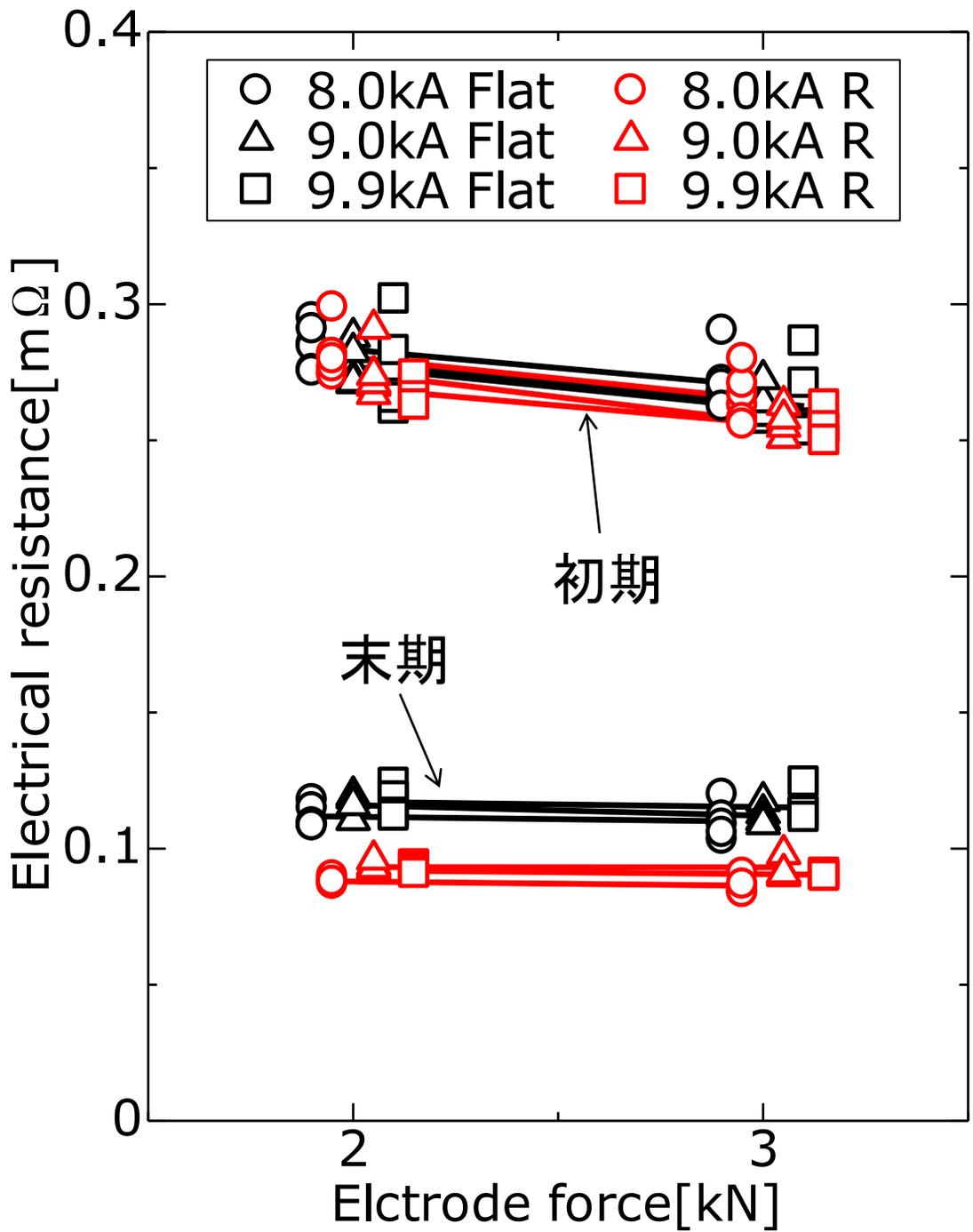


Fig.3-12 Effect of electrode force on electrical resistance at initial and final stage of welding

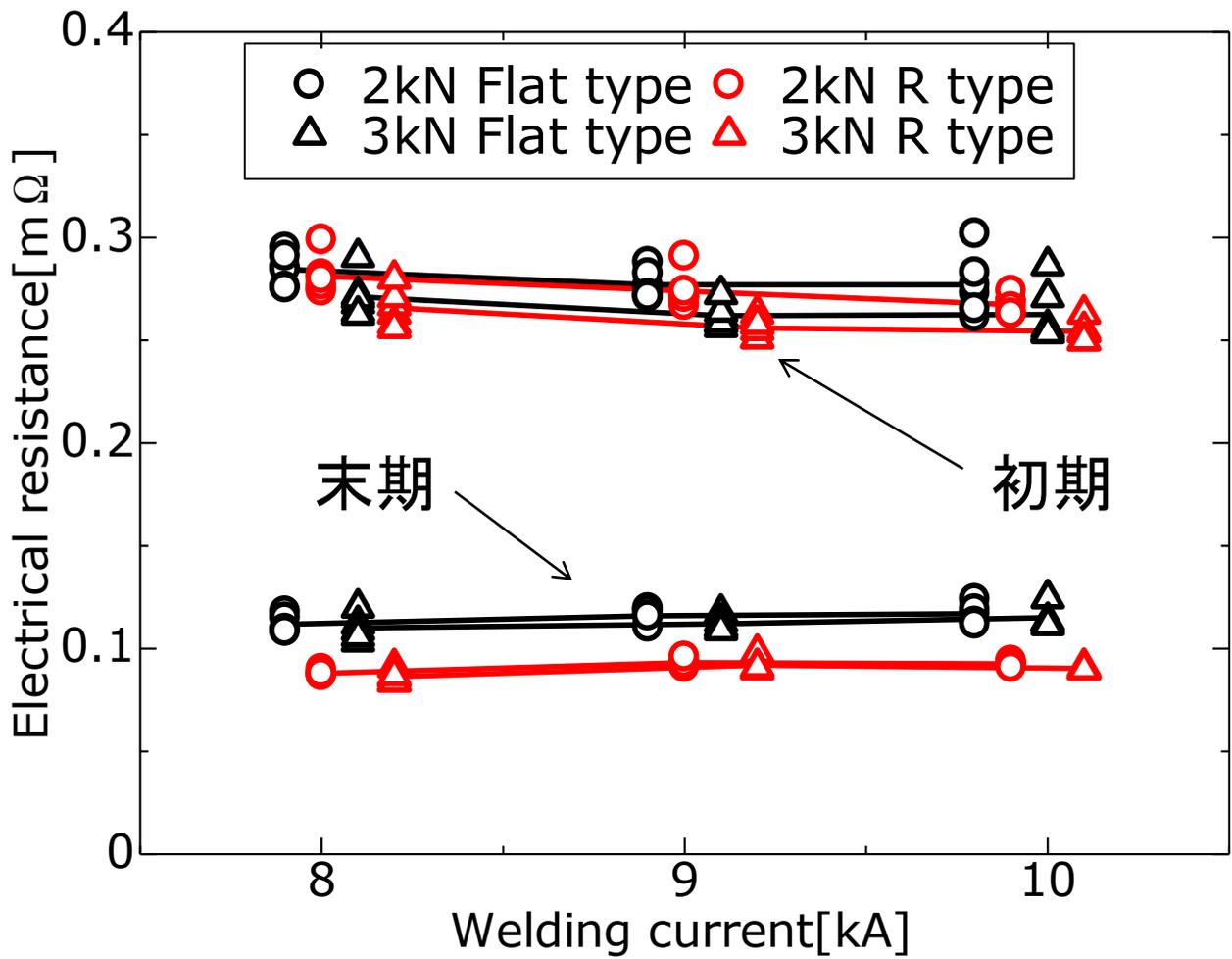


Fig.3-13 Effect of welding current on electrical resistance at initial and final stage of welding

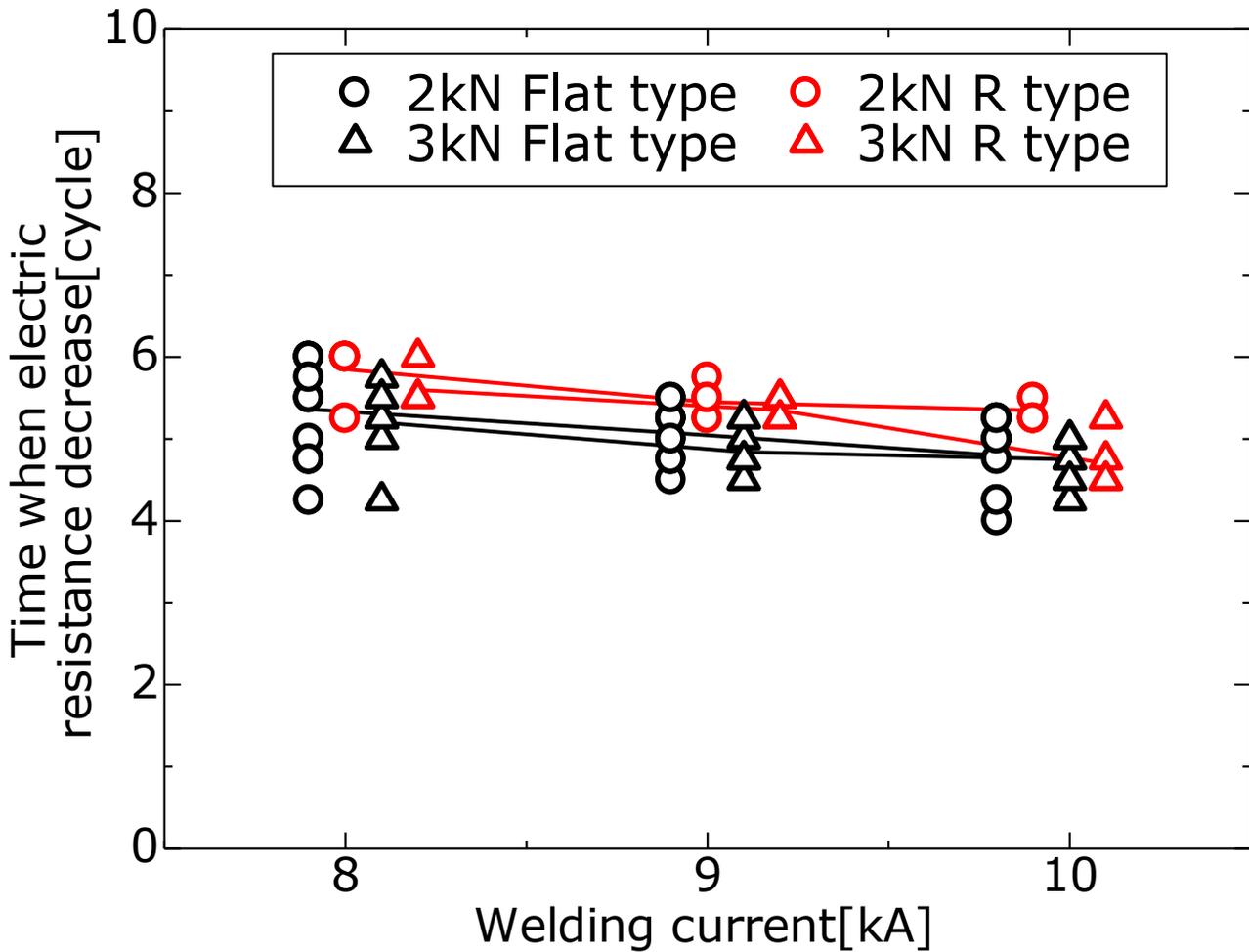


Fig.3-14 Effect of welding current on time when electric resistance decrease

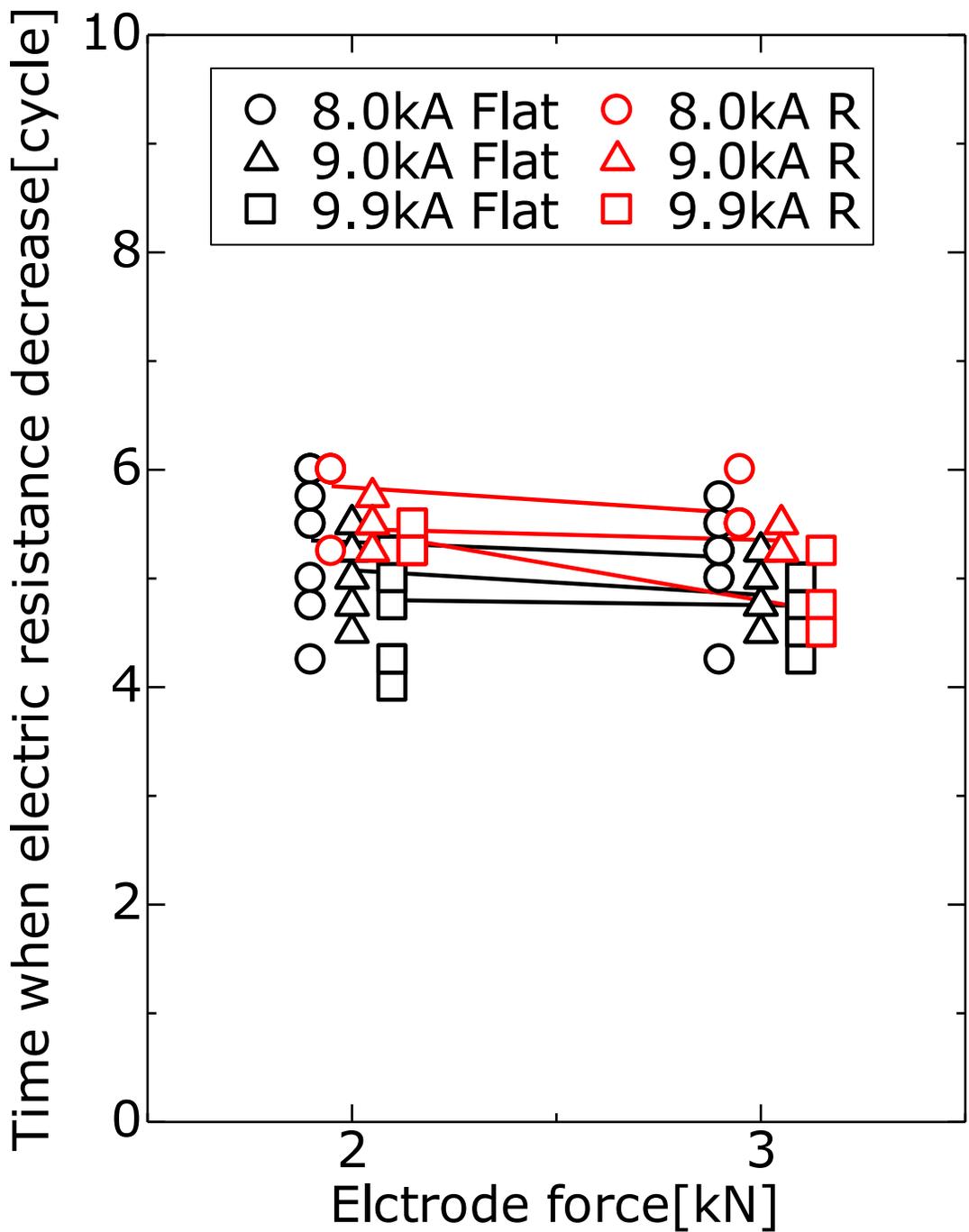


Fig.3-15 Effect of electrode force on time when electric resistance decrease

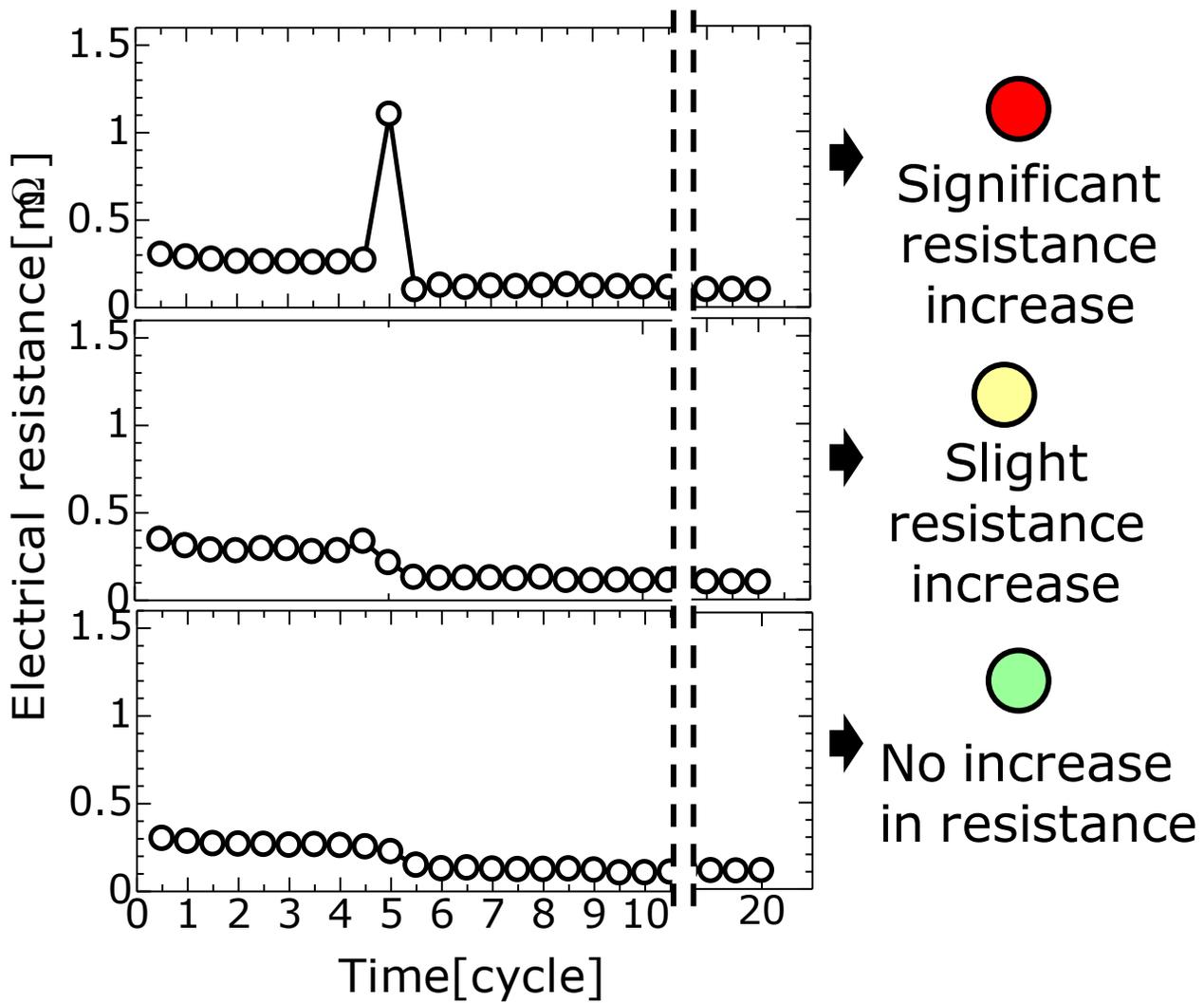


Fig.3-16 Evaluation method of increase phenomenon of electric resistance

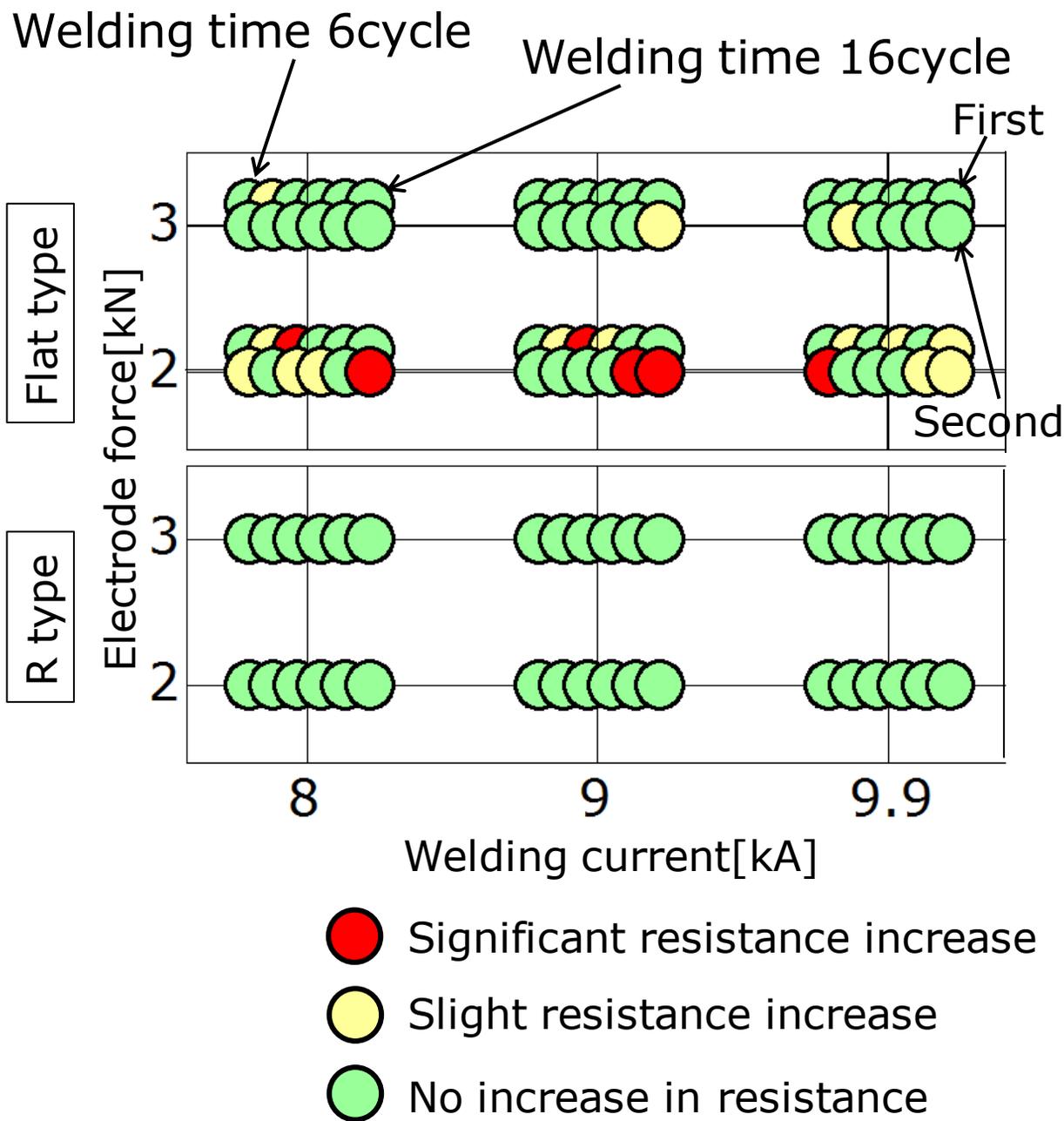


Fig.3-17 Diagram comparing increase phenomenon of electric resistance with lower electrode

Table 3-1 Time when resistance increase and increase in electrical resistance in significant resistance increase

Significant resistance increase						
Time [cycle]	Current [kA]	Force [kN]	Number		Time when resistance increase [ms]	Increase in electrical resistance [mΩ]
6	9.9	2	No.2		2.7	12.2
10	8.0	2	No.1		3.7	30.8
10	9.0	2	No.1		2.8	28.9
14	9.0	2	No.2		2.0	6.6
16	8.0	2	No.2		2.8	21.2
16	9.0	2	No.2		4.0	28.8

Table 3-2 Time when resistance increase and increase in electrical resistance in slight resistance increase

Slight resistance increase						
Time [cycle]	Current [kA]	Force [kN]	Number		Time when resistance increase [ms]	Increase in electrical resistance [mΩ]
6	8.0	2	No.2		2.6	0.06
8	8.0	2	No.1		2.7	0.18
8	9.0	2	No.1		2.3	0.06
8	9.9	2	No.1		2.6	0.14
8	9.9	3	No.2		3.0	0.11
10	8.0	2	No.2		3.2	0.22
12	8.0	2	No.2		3.7	0.07
12	9.0	2	No.1		3.5	0.25
12	9.9	2	No.1		4.1	0.10
14	9.9	2	No.2		2.2	0.09
16	9.0	3	No.2		3.6	0.04
16	9.9	2	No.1		2.5	0.22
16	9.9	2	No.2		2.1	0.18

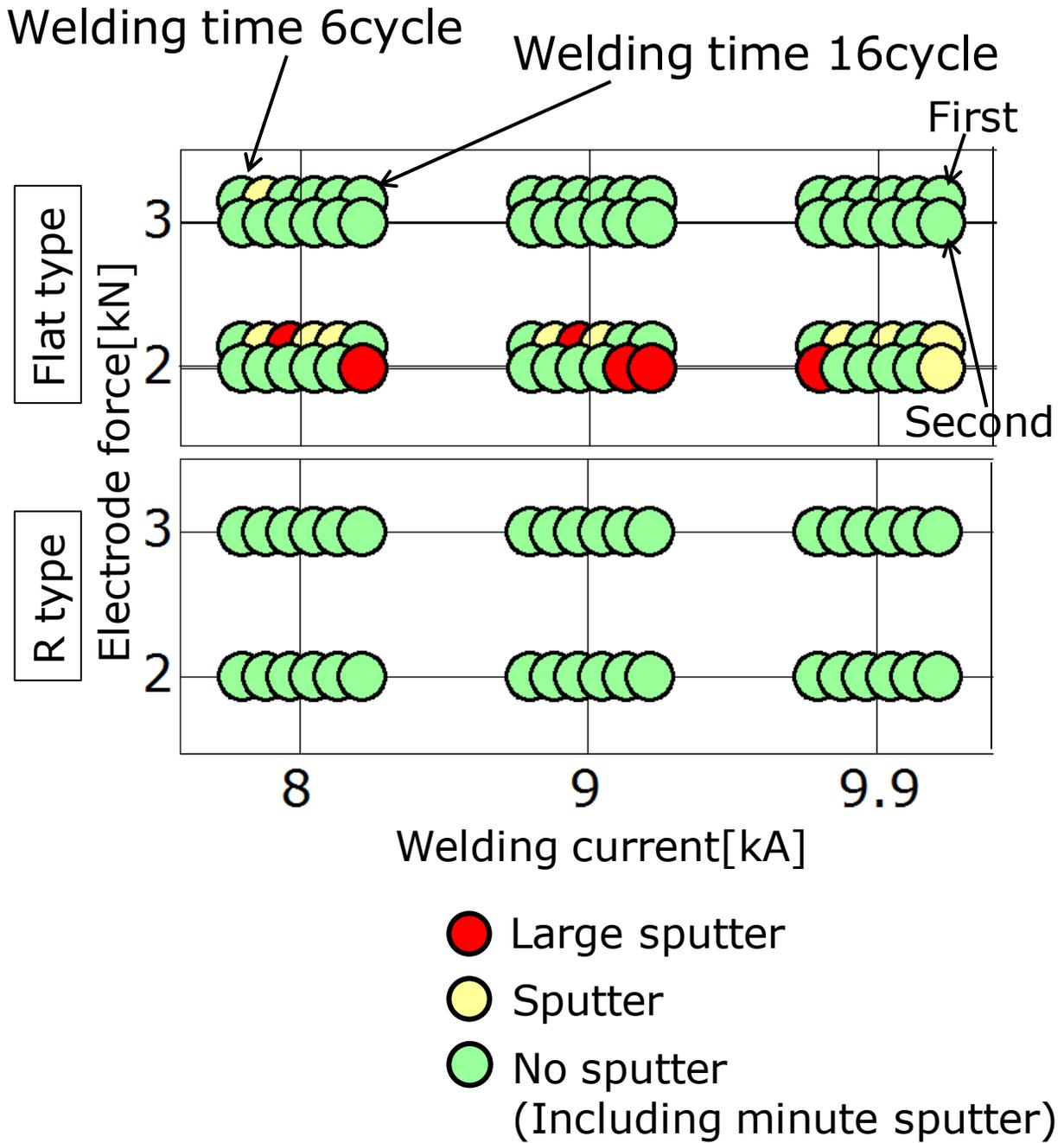
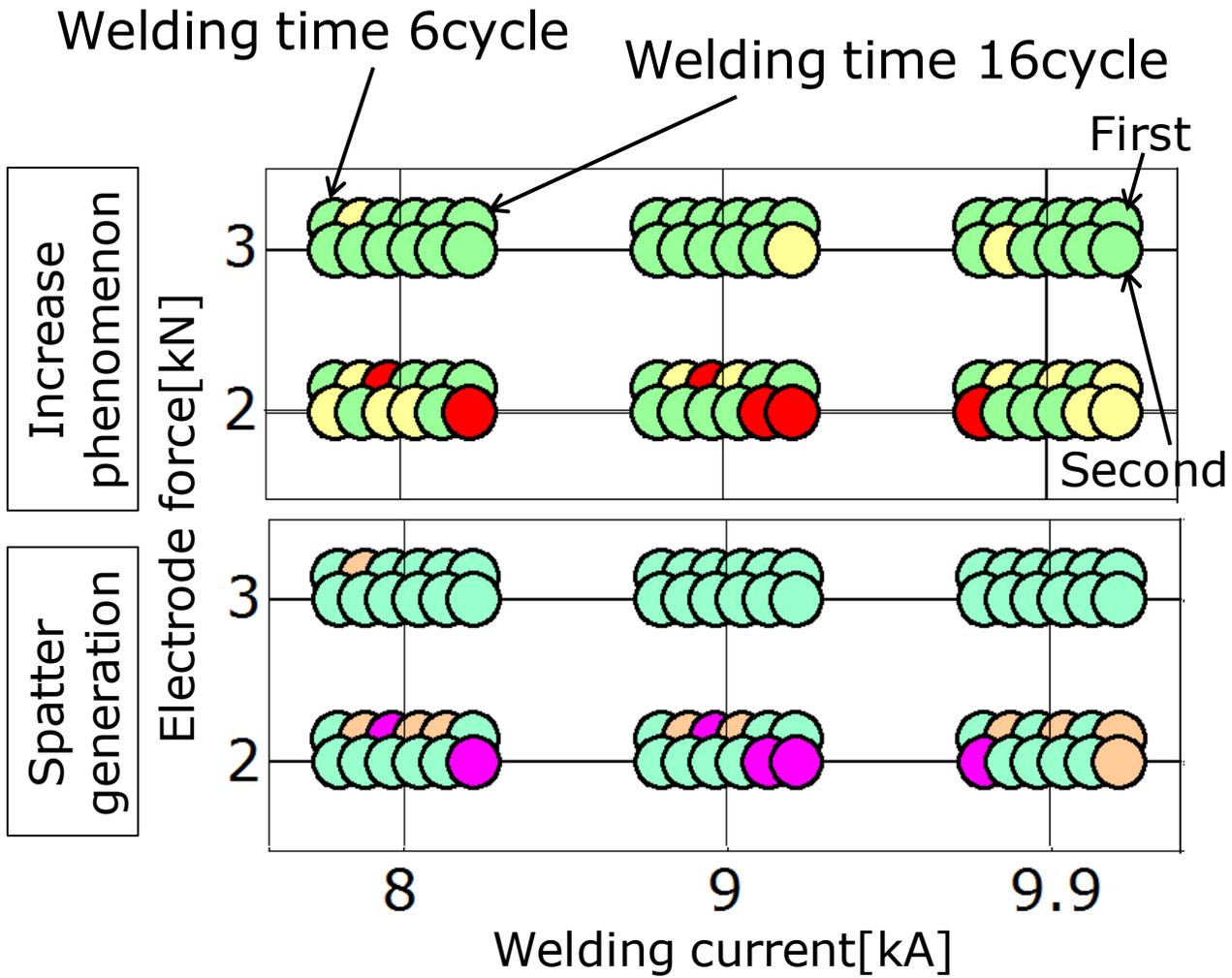


Fig.3-18 Diagram comparing spatter generation condition with lower electrode



- Increase phenomenon
- Significant resistance increase
 - Slight resistance increase
 - No increase in resistance
- Spatter generation
- Large spatter
 - Spatter
 - No spatter (Including minute spatter)

Fig.3-19 Diagram comparing increase phenomenon of electric resistance and spatter generation condition

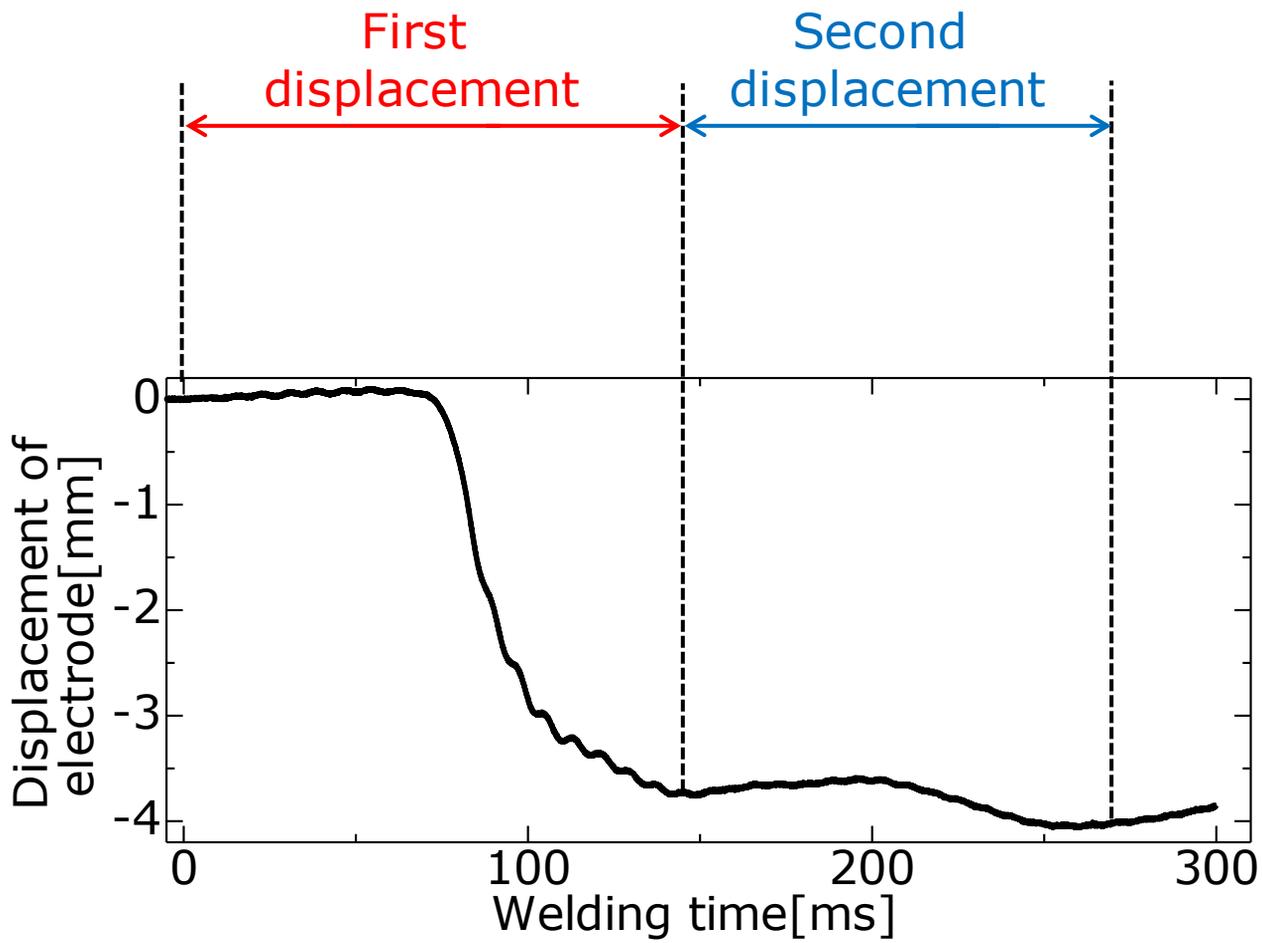


Fig.3-20 Example for explanation of electrode displacement

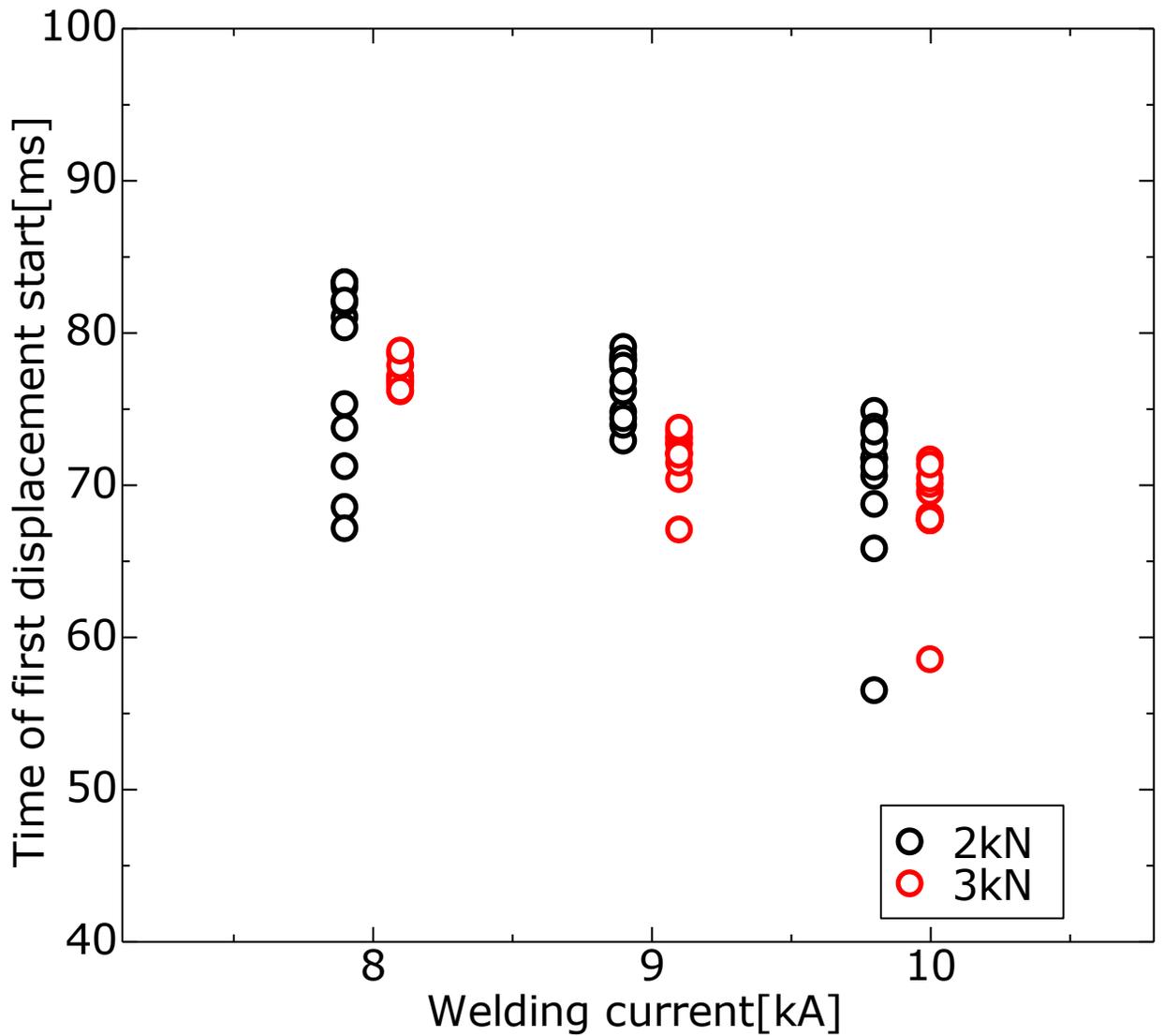


Fig.3-21 Effect of welding current on time of first displacement start using flat type

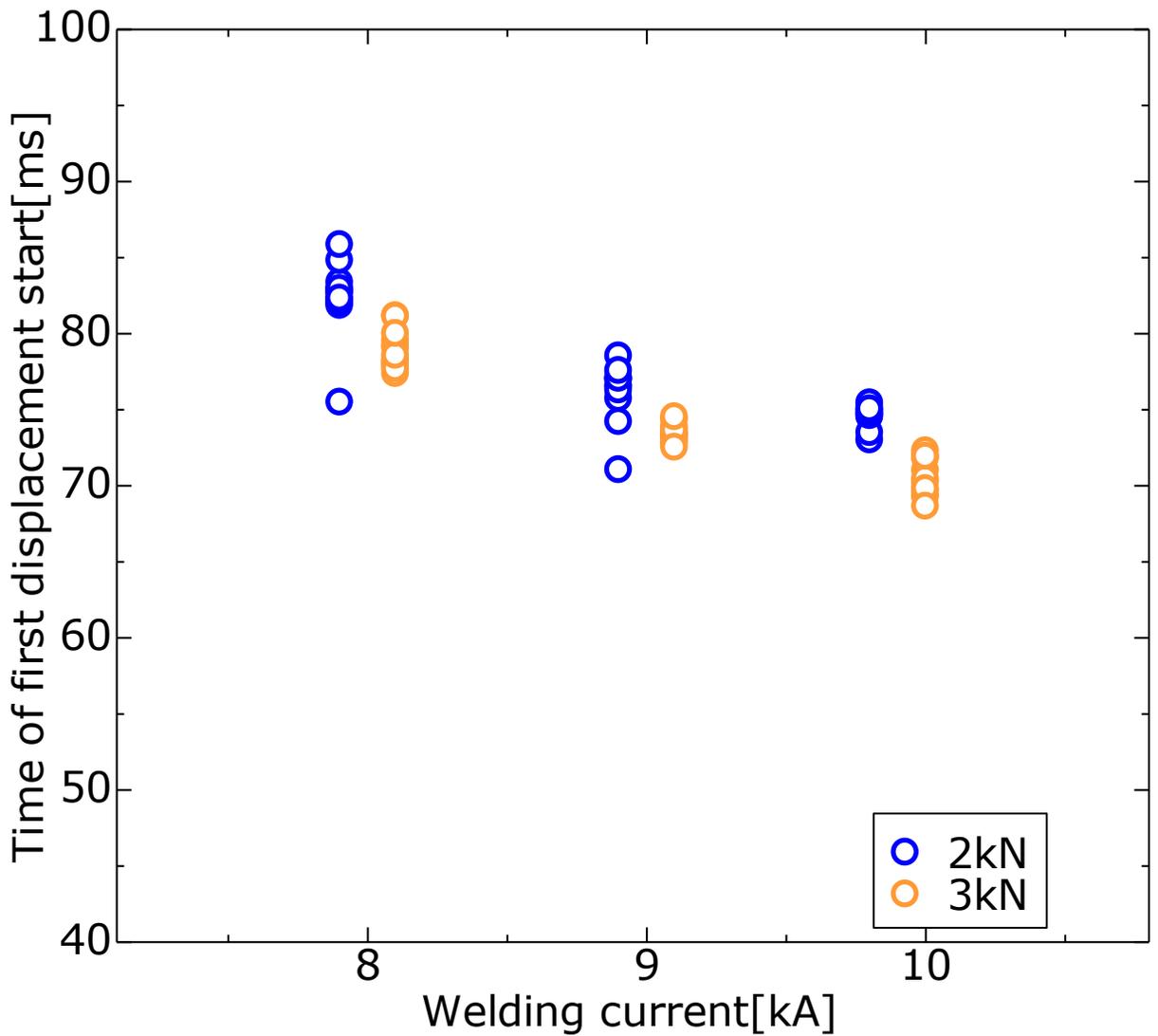


Fig.3-22 Effect of welding current on time of first displacement start using R type

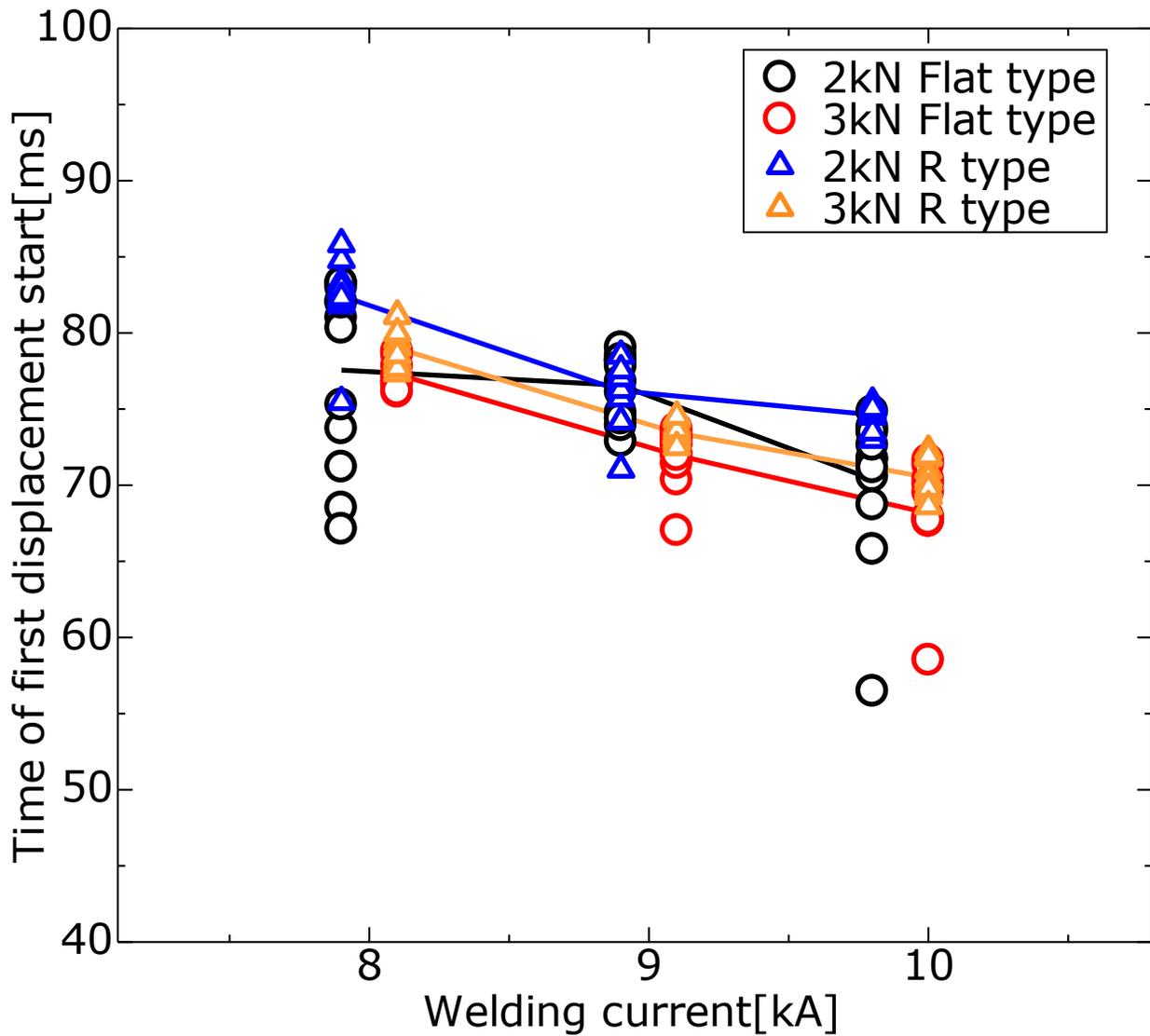


Fig.3-23 Effect of welding current on time of first displacement start

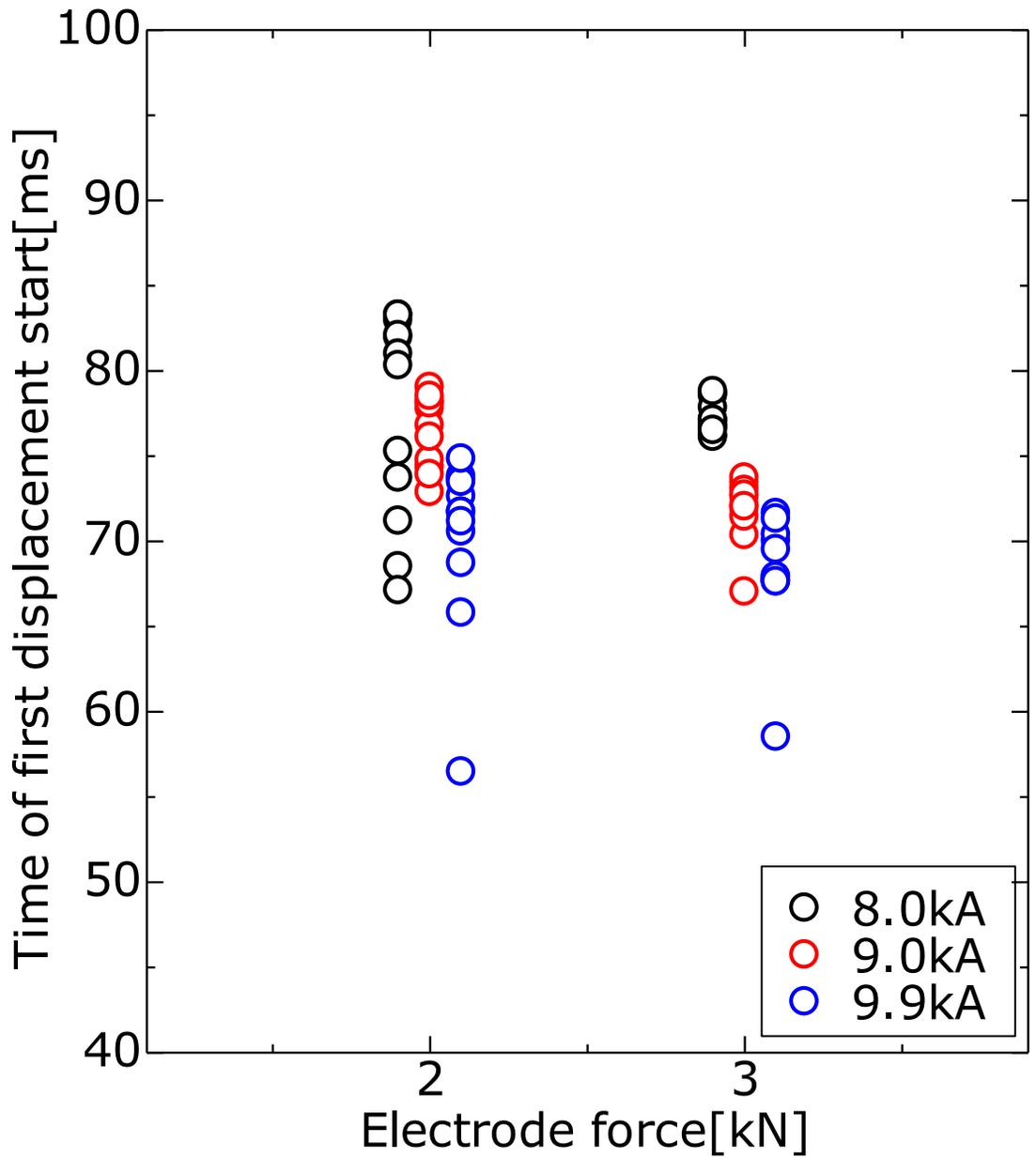


Fig.3-24 Effect of electrode force on time of first displacement start using flat type

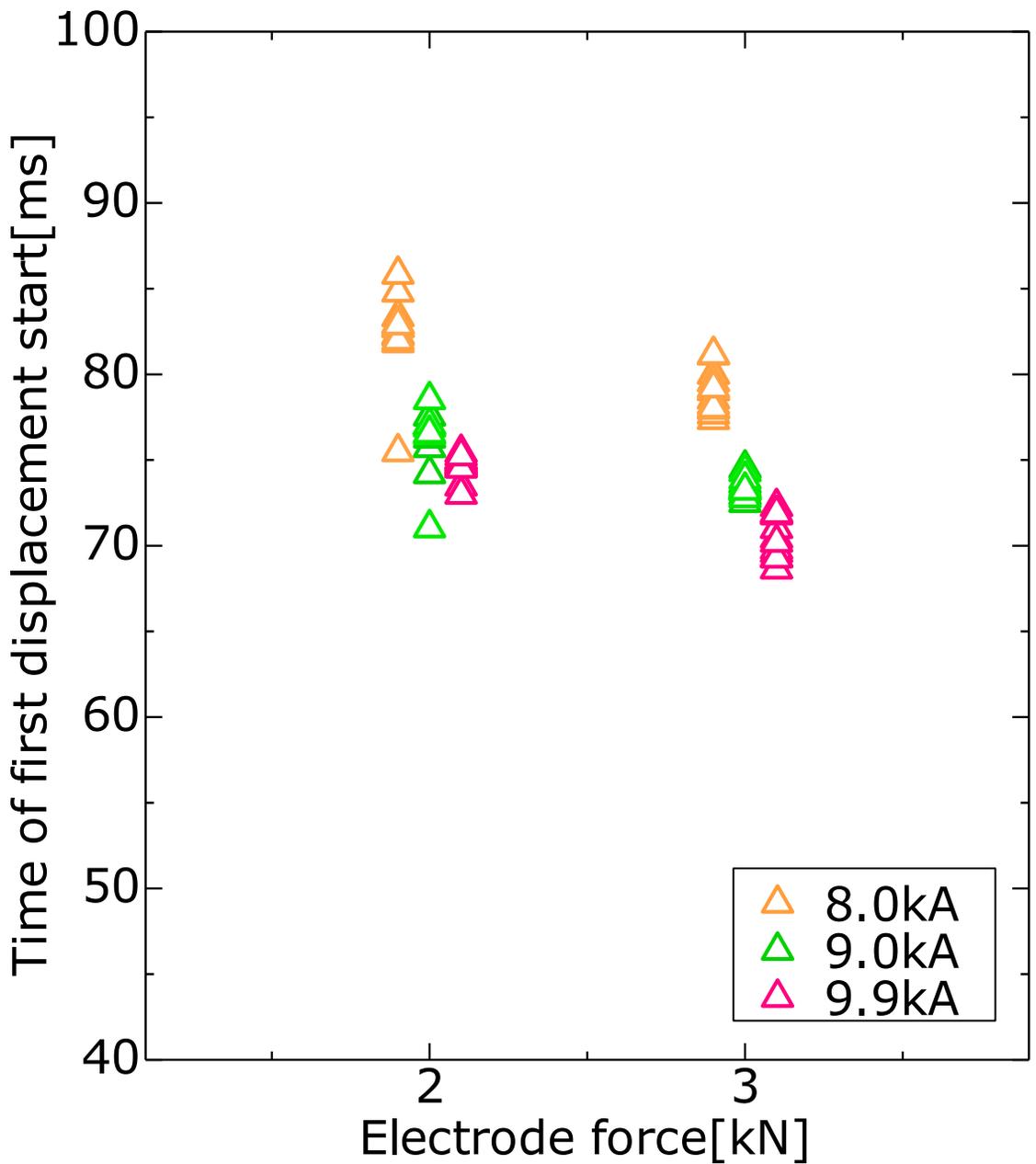


Fig.3-25 Effect of electrode force on time of first displacement start using R type

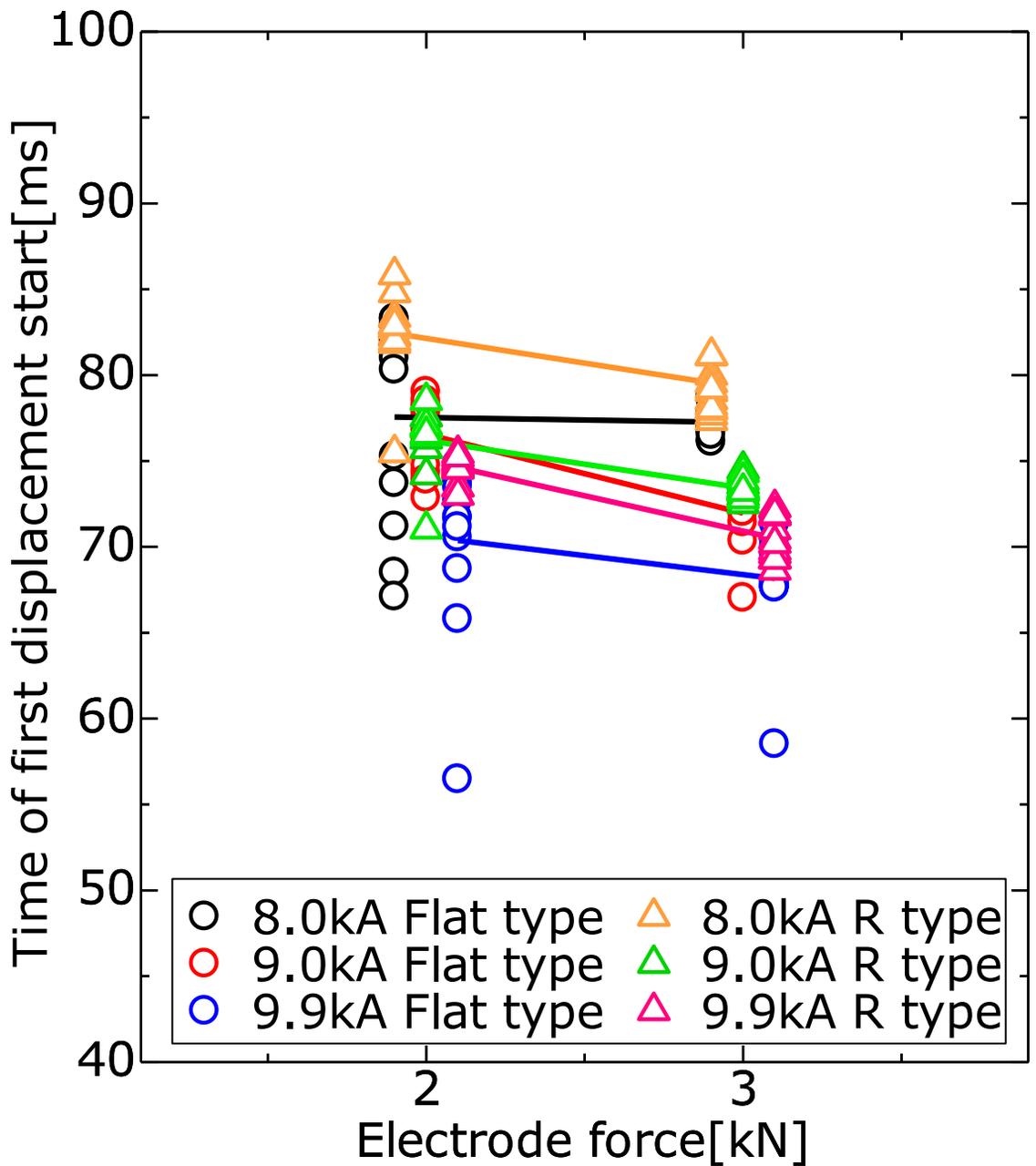


Fig.3-26 Effect of electrode force on time of first displacement start

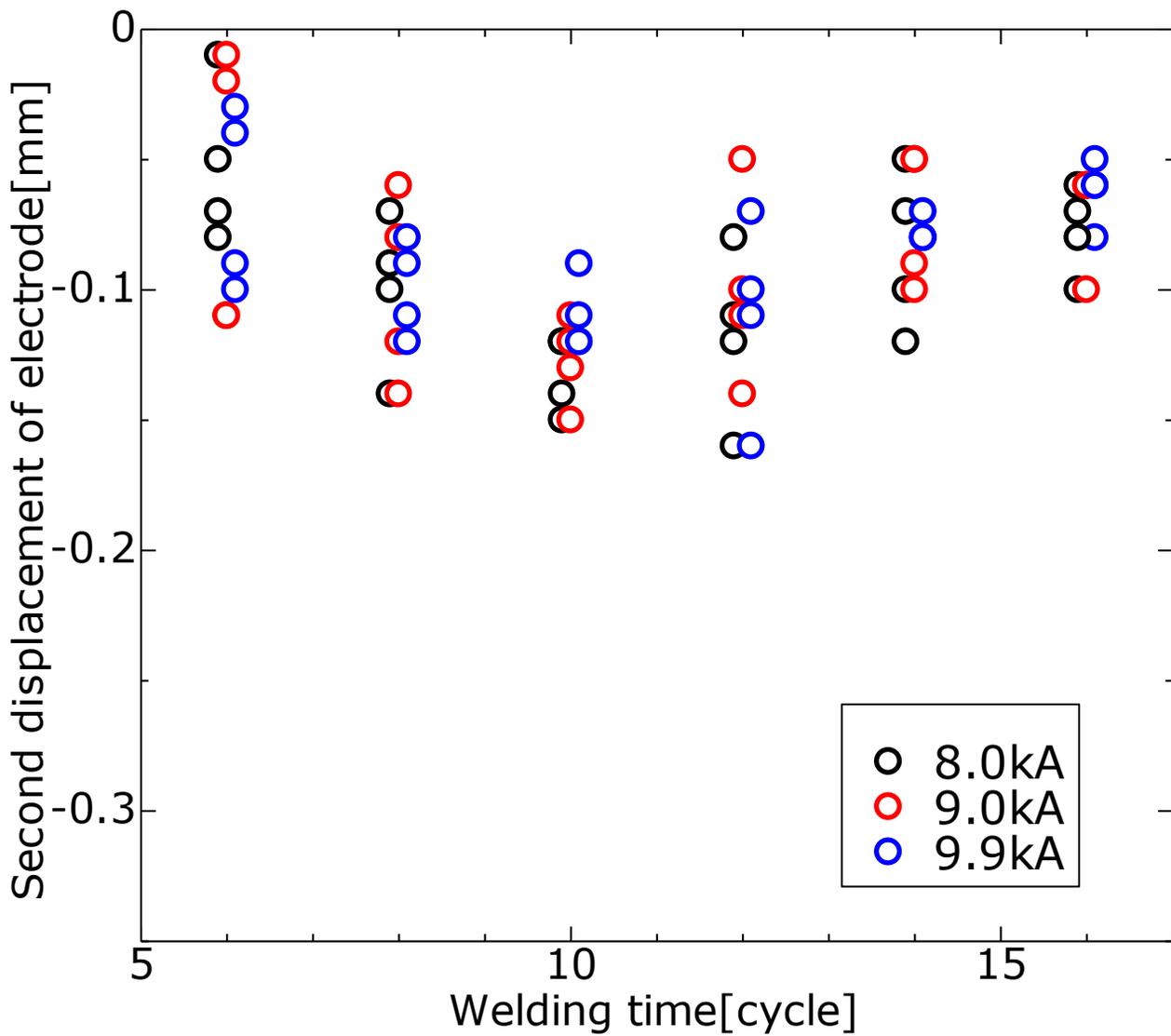


Fig.3-27 Effect of welding time on second displacement of electrode using flat type

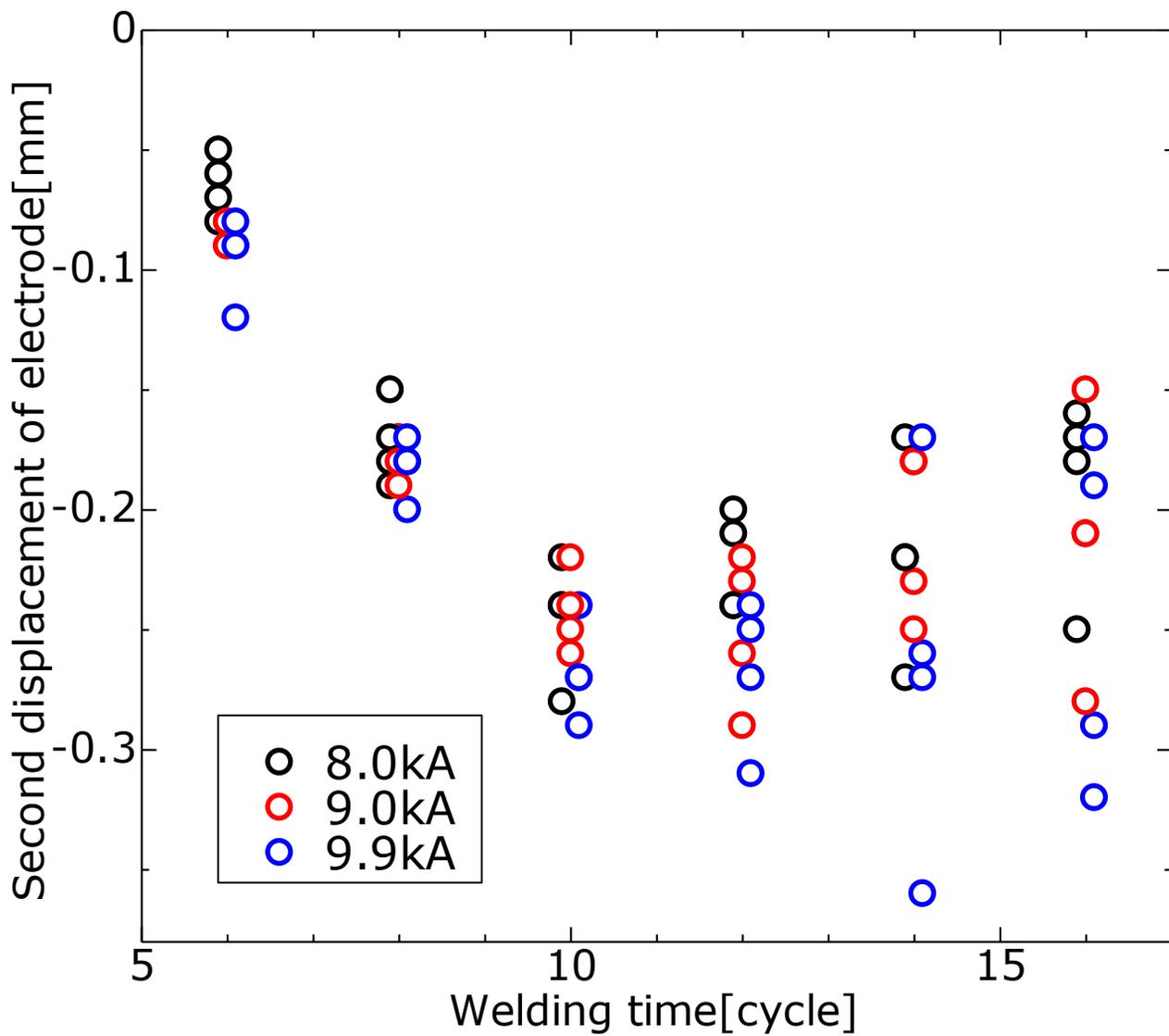


Fig.3-28 Effect of welding time on second displacement of electrode using R type

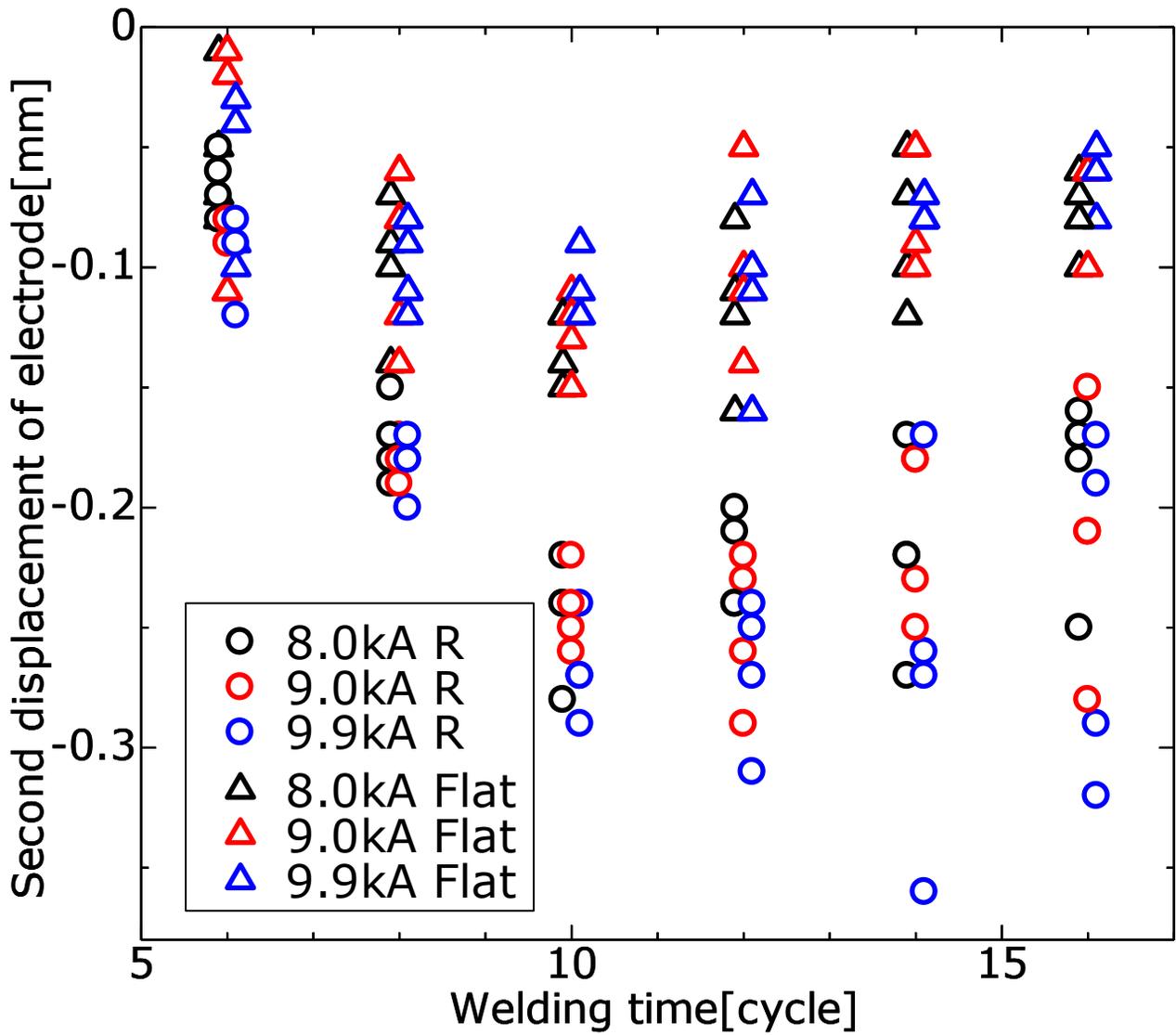


Fig.3-29 Effect of welding time on second displacement of electrode

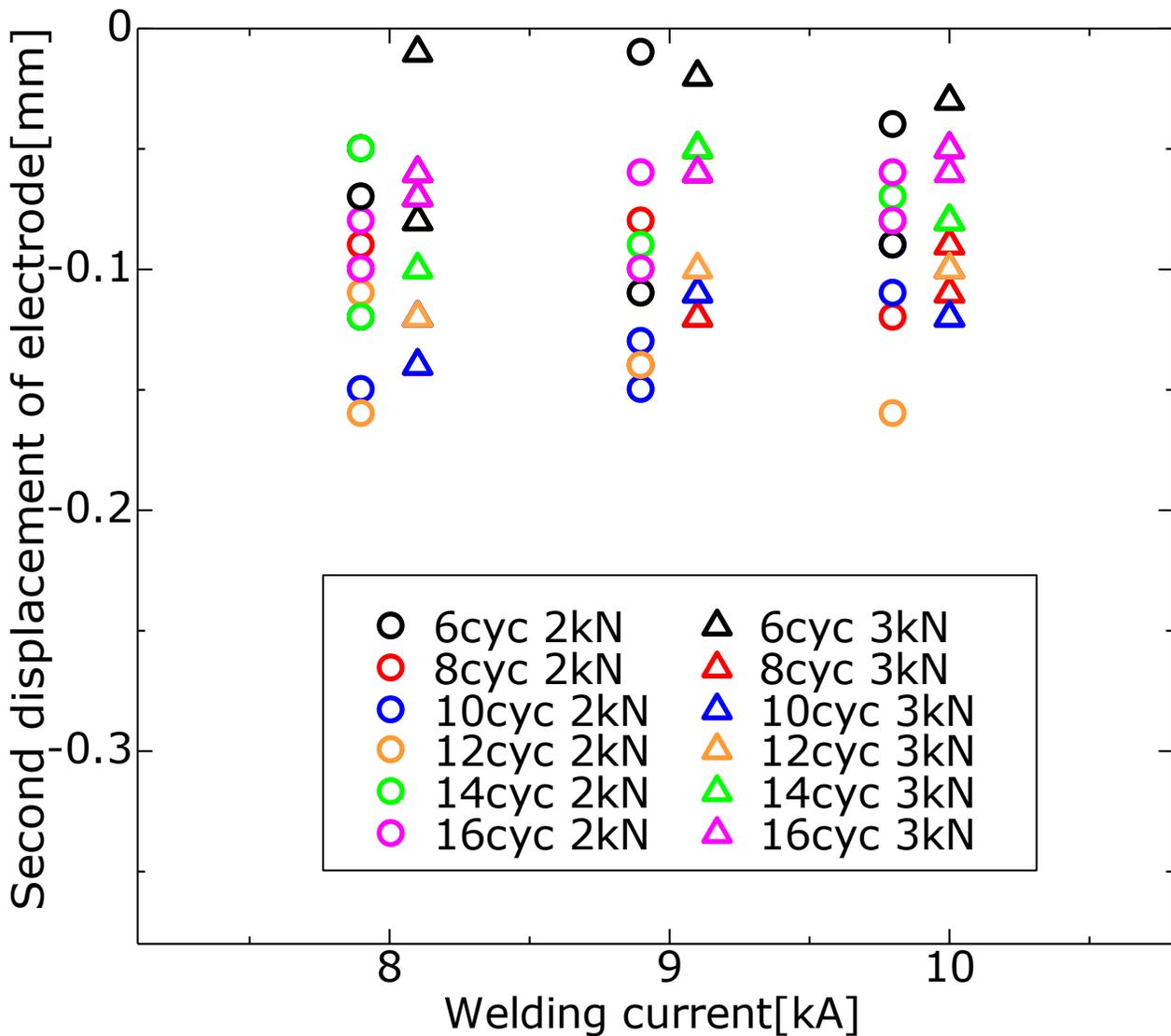


Fig.3-30 Effect of welding current on second displacement of electrode using flat type

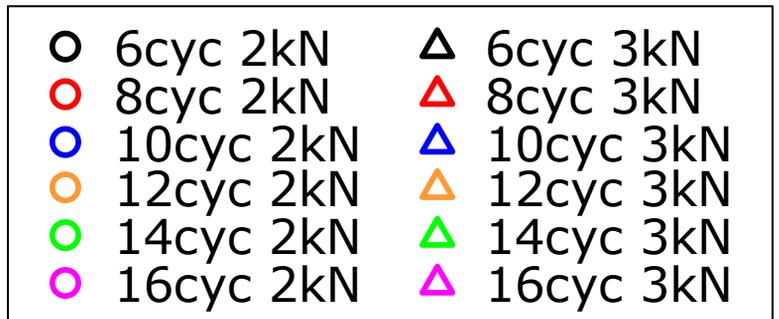
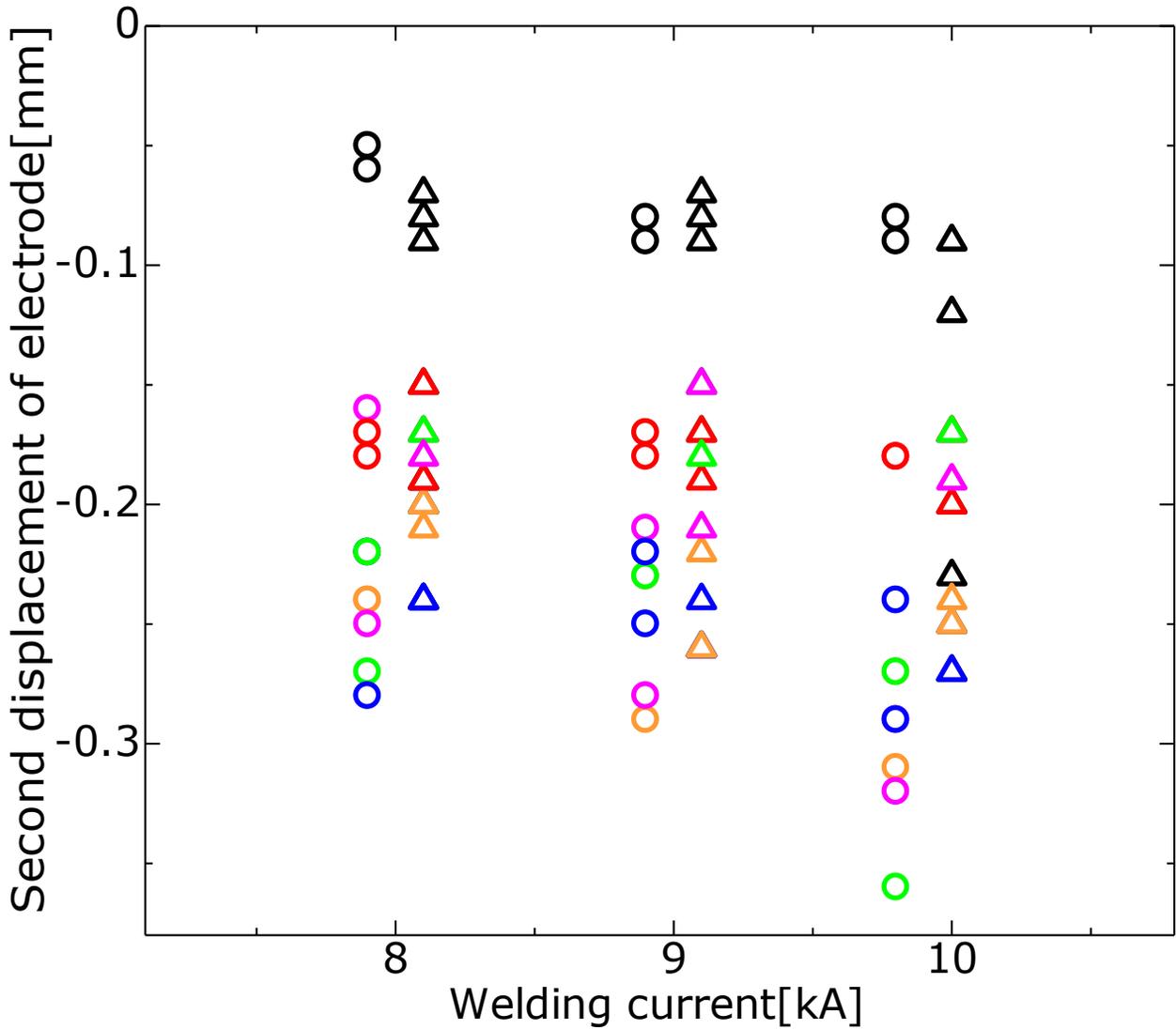


Fig.3-31 Effect of welding current on second displacement of electrode using R type

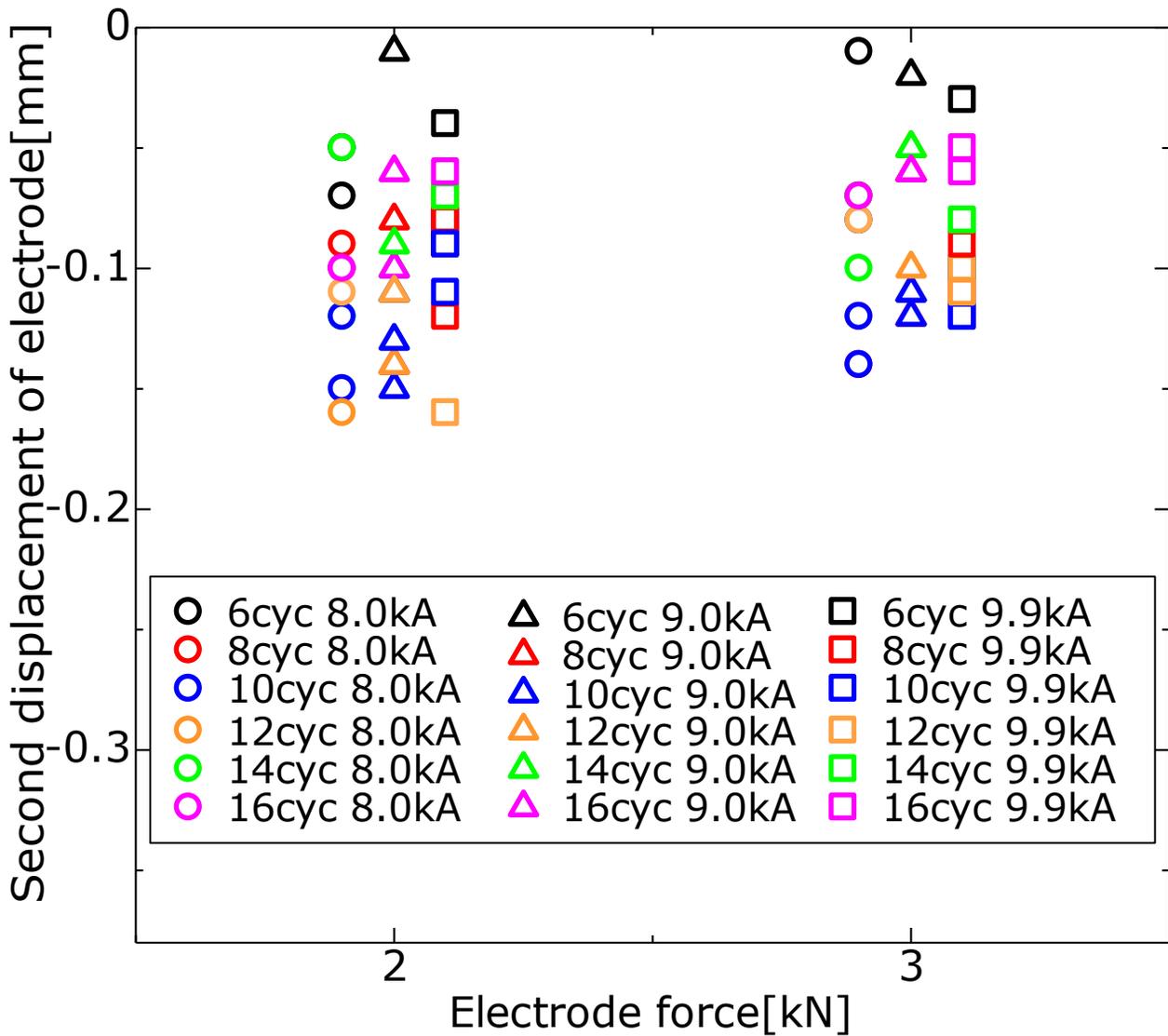


Fig.3-32 Effect of electrode force on second displacement of electrode using flat type

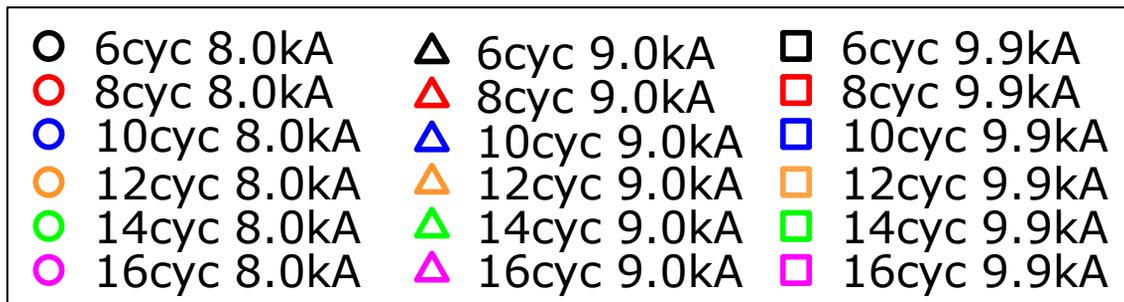
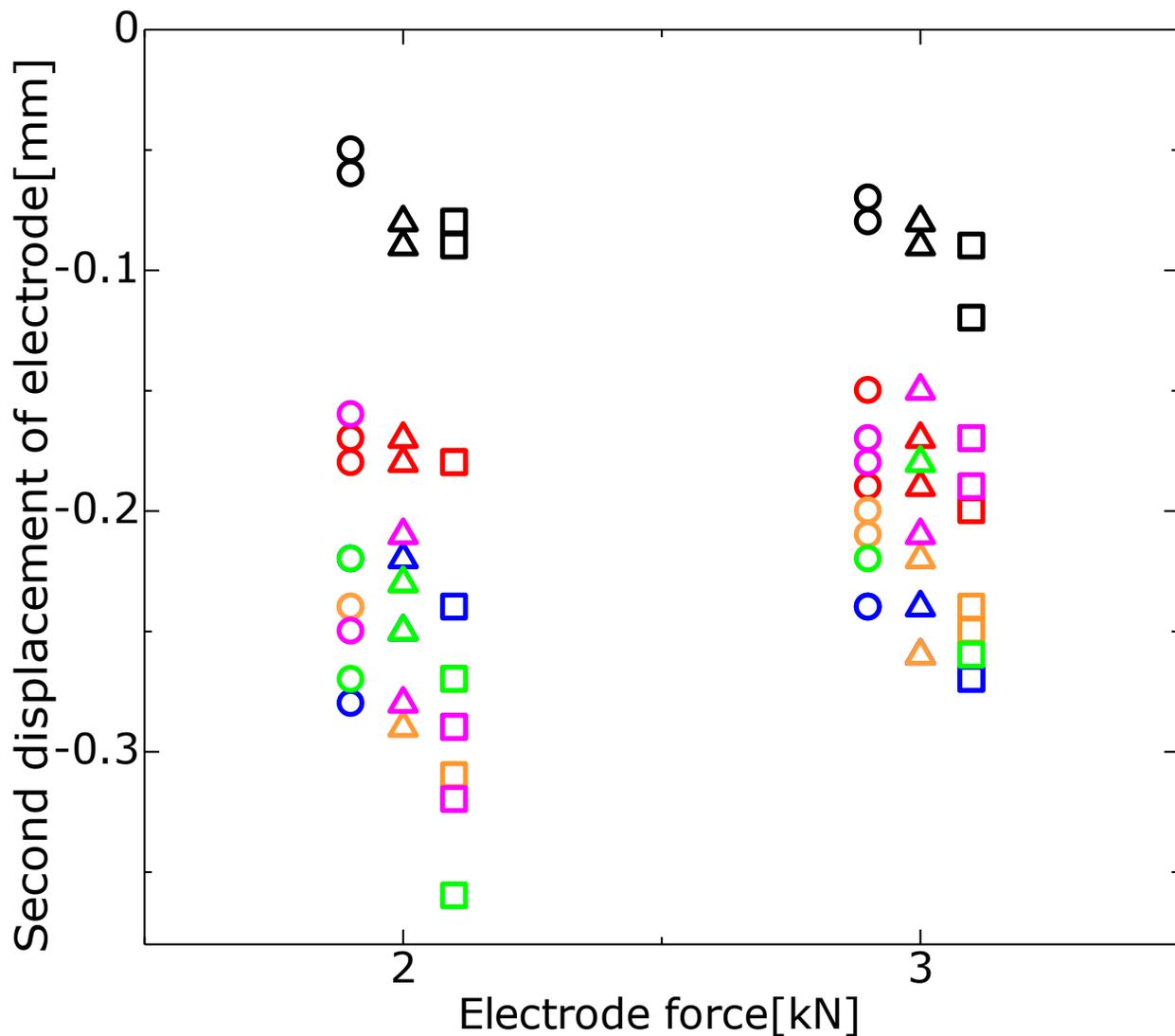


Fig.3-33 Effect of electrode force on second displacement of electrode using R type

Front side of welder



Back side of welder



Fig.4-1 Section observation result after welding of 6cycle,8.0kA,1kN using R type

		Welding time[cycle]					
		6	8	10	12	14	16
Force[kN]	3kN						
	2kN						
		8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9	8 9 9.9
		Welding current[kA]					

Fig.4-2 Section observation result using a R type as the lower electrode(First&Second time)

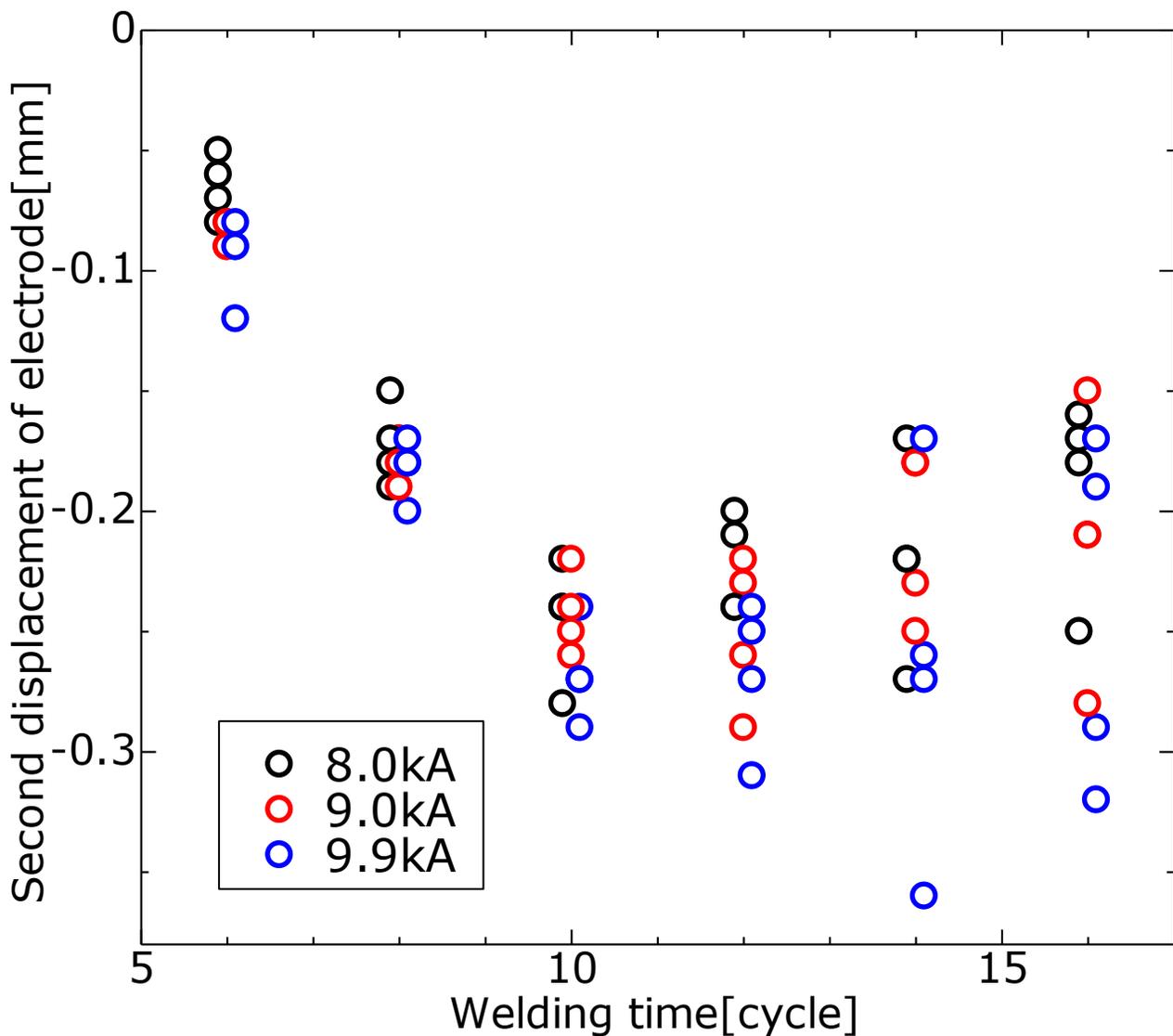


Fig.4-3 Effect of welding time on second displacement of electrode using R type

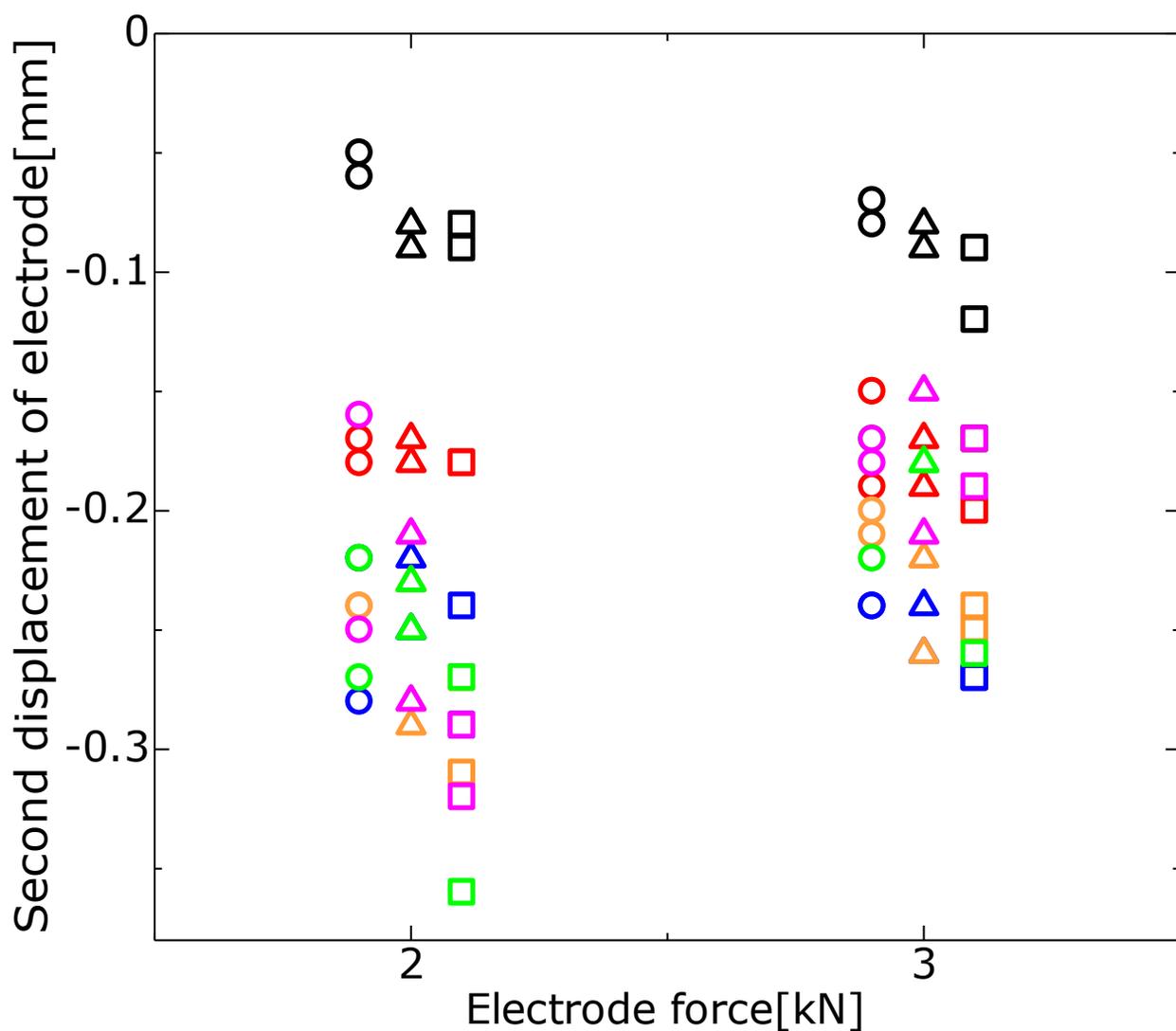


Fig.4-4 Effect of electrode force on second displacement of electrode using R type

Flat type



R type



Fig.4-5 Result of pressure measurement

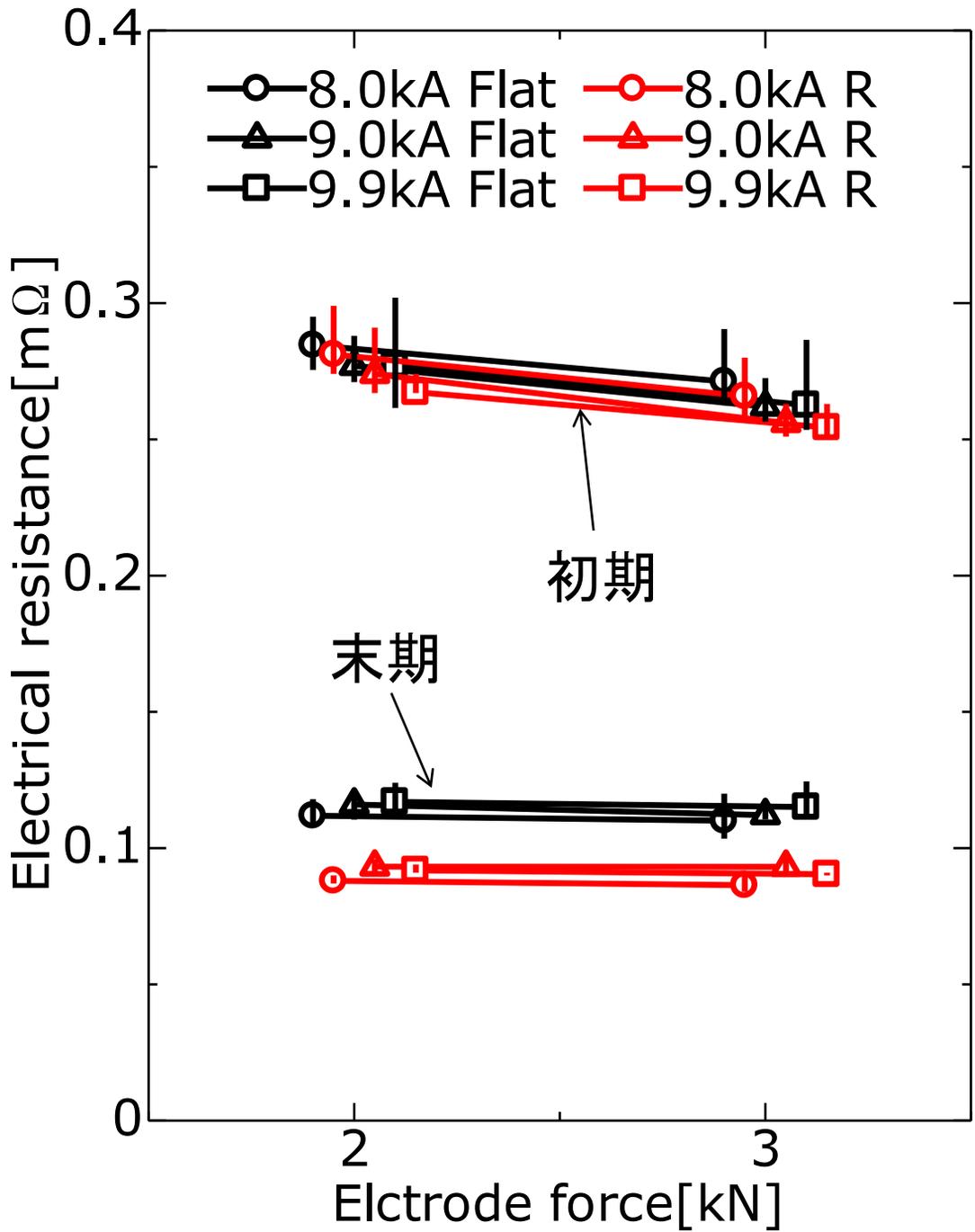


Fig.4-6 Effect of electrode force on electrical resistance at the initial and final stage of welding

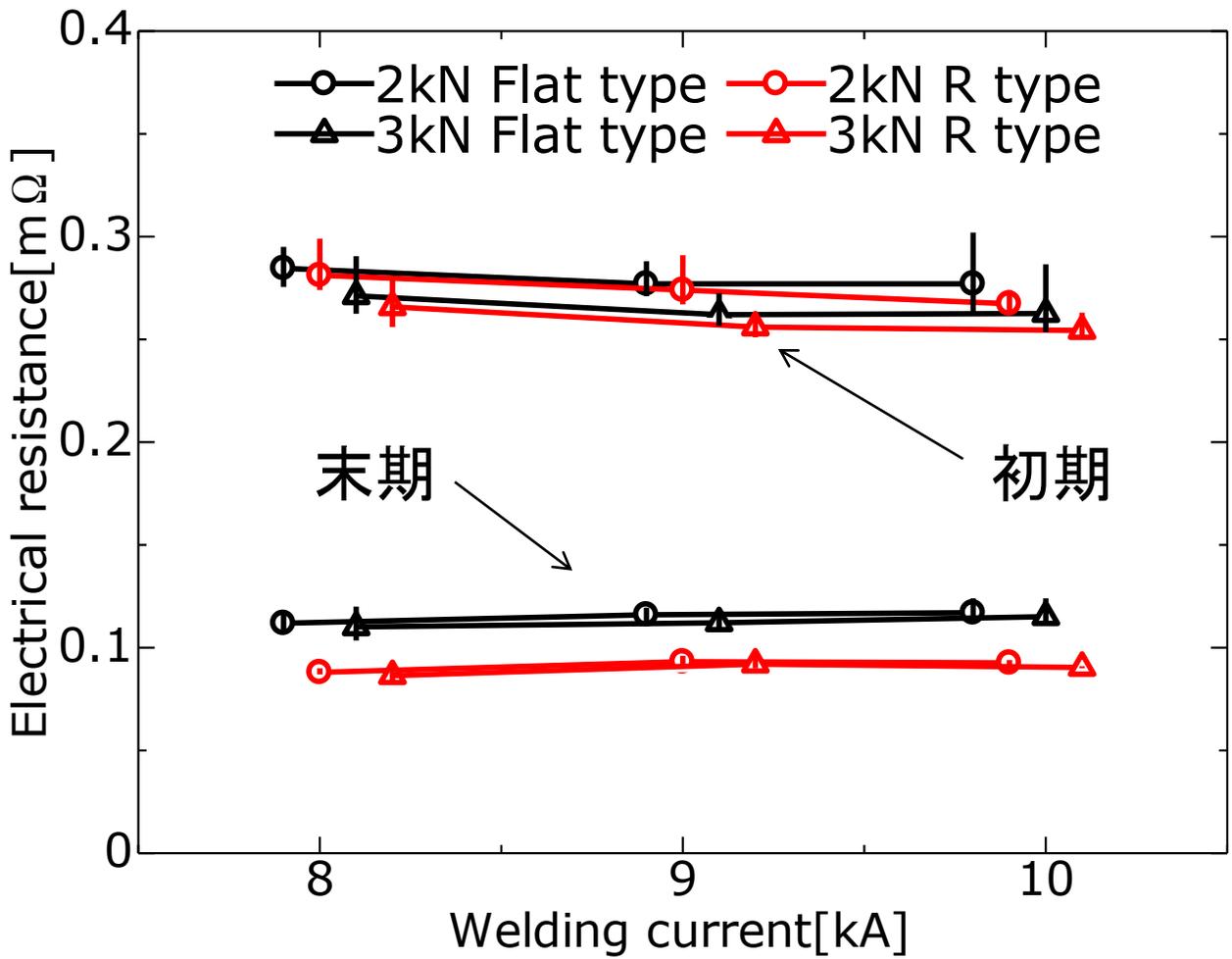


Fig.4-7 Effect of welding current on electrical resistance at the initial and final stage of welding

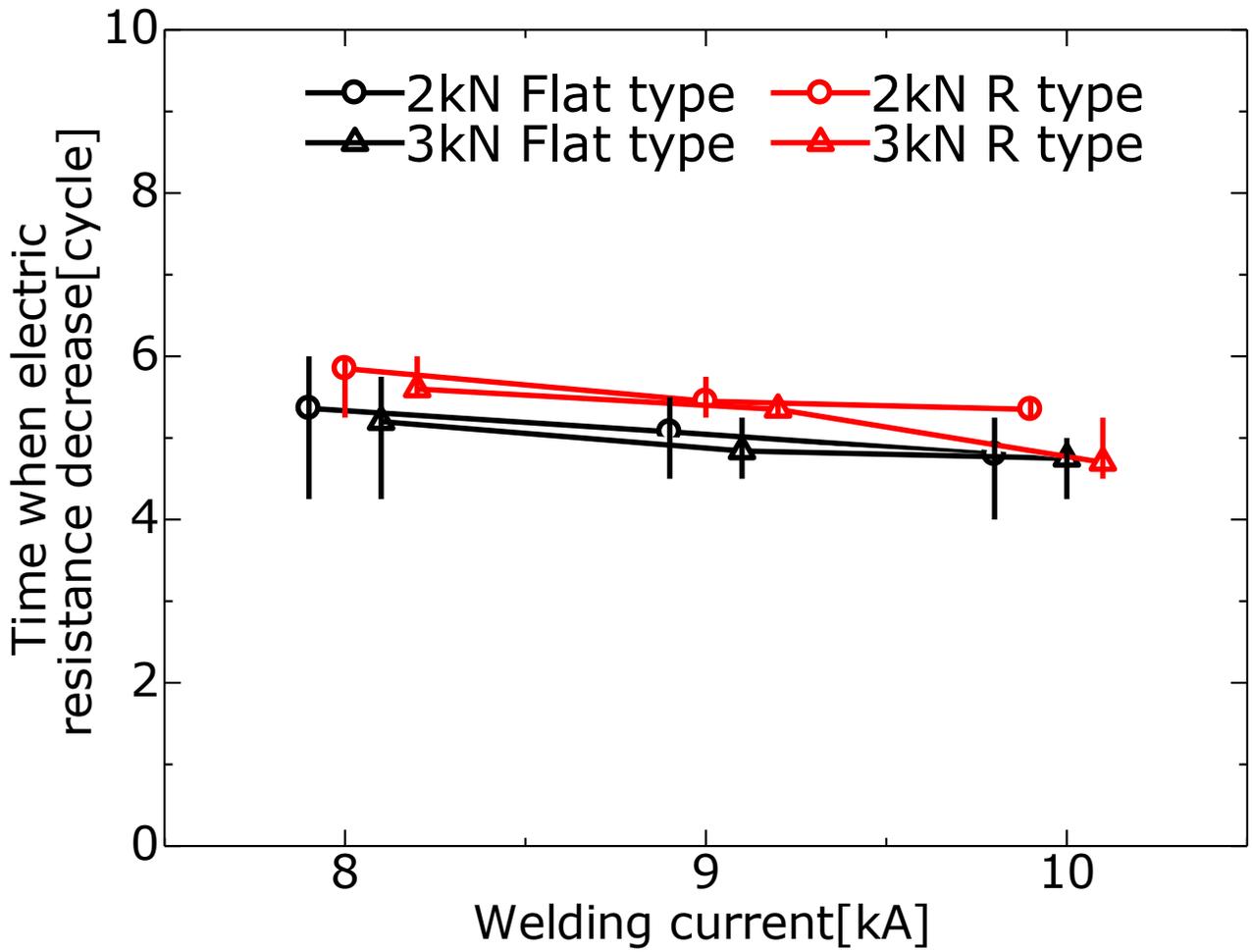


Fig.4-8 Effect of welding current on time when electric resistance decrease

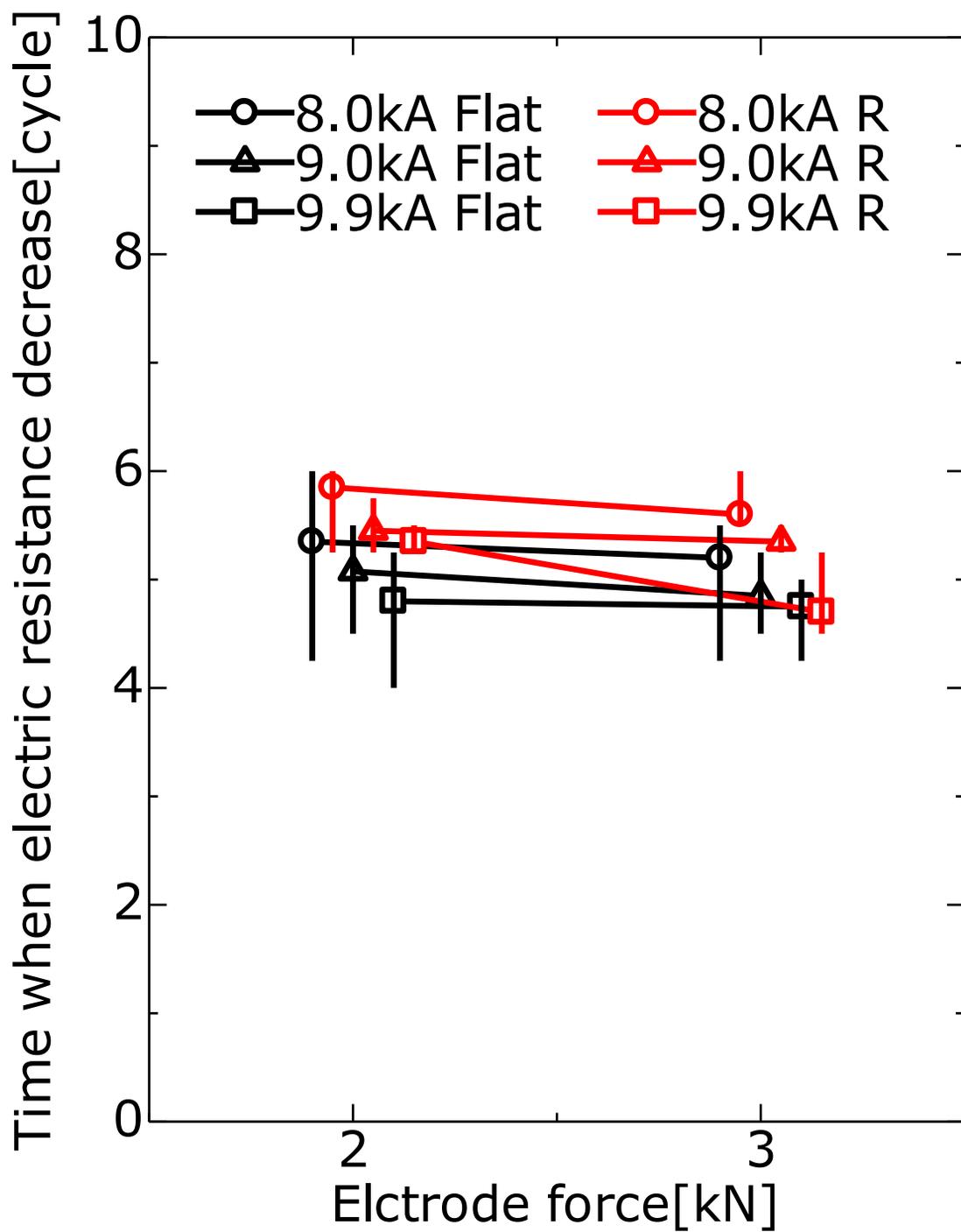


Fig.4-9 Effect of electrode force on time when electric resistance decrease

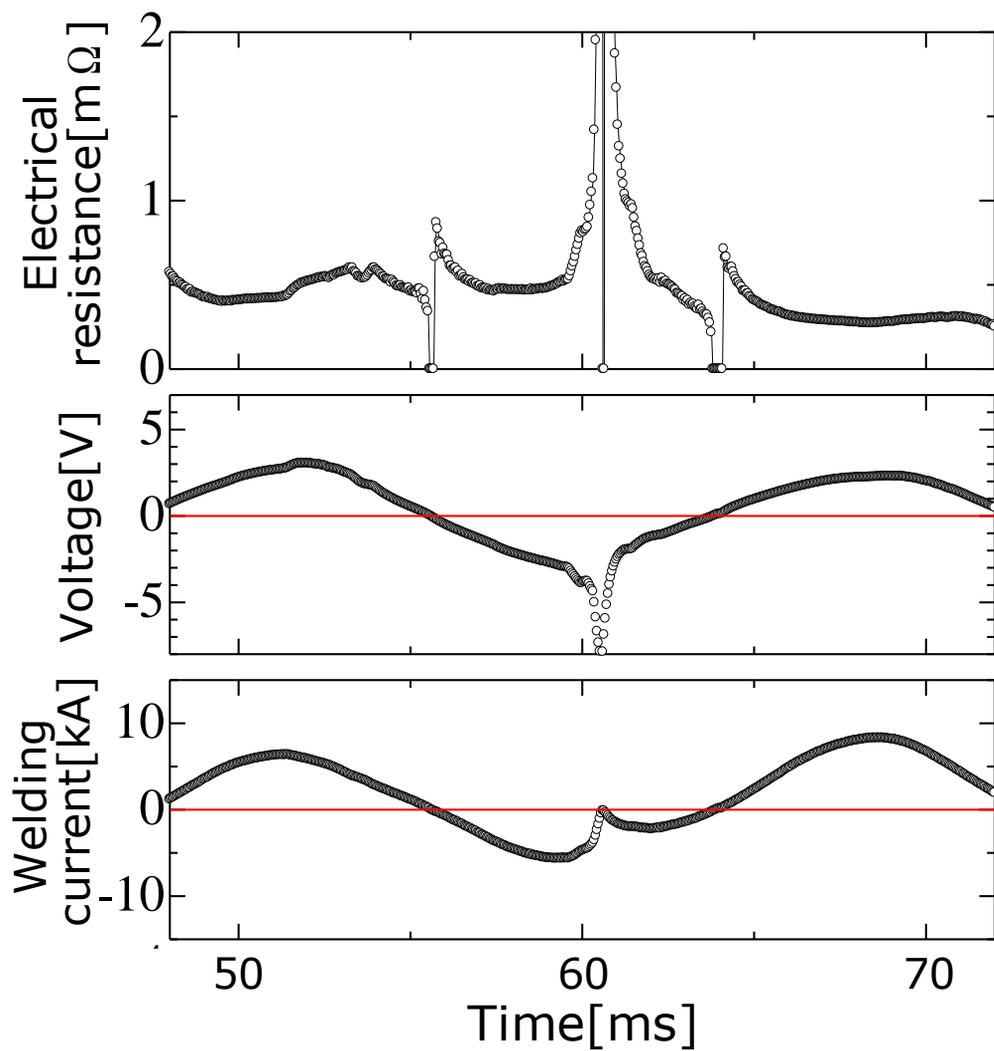


Fig.4-10 Example of enlarged view of each condition

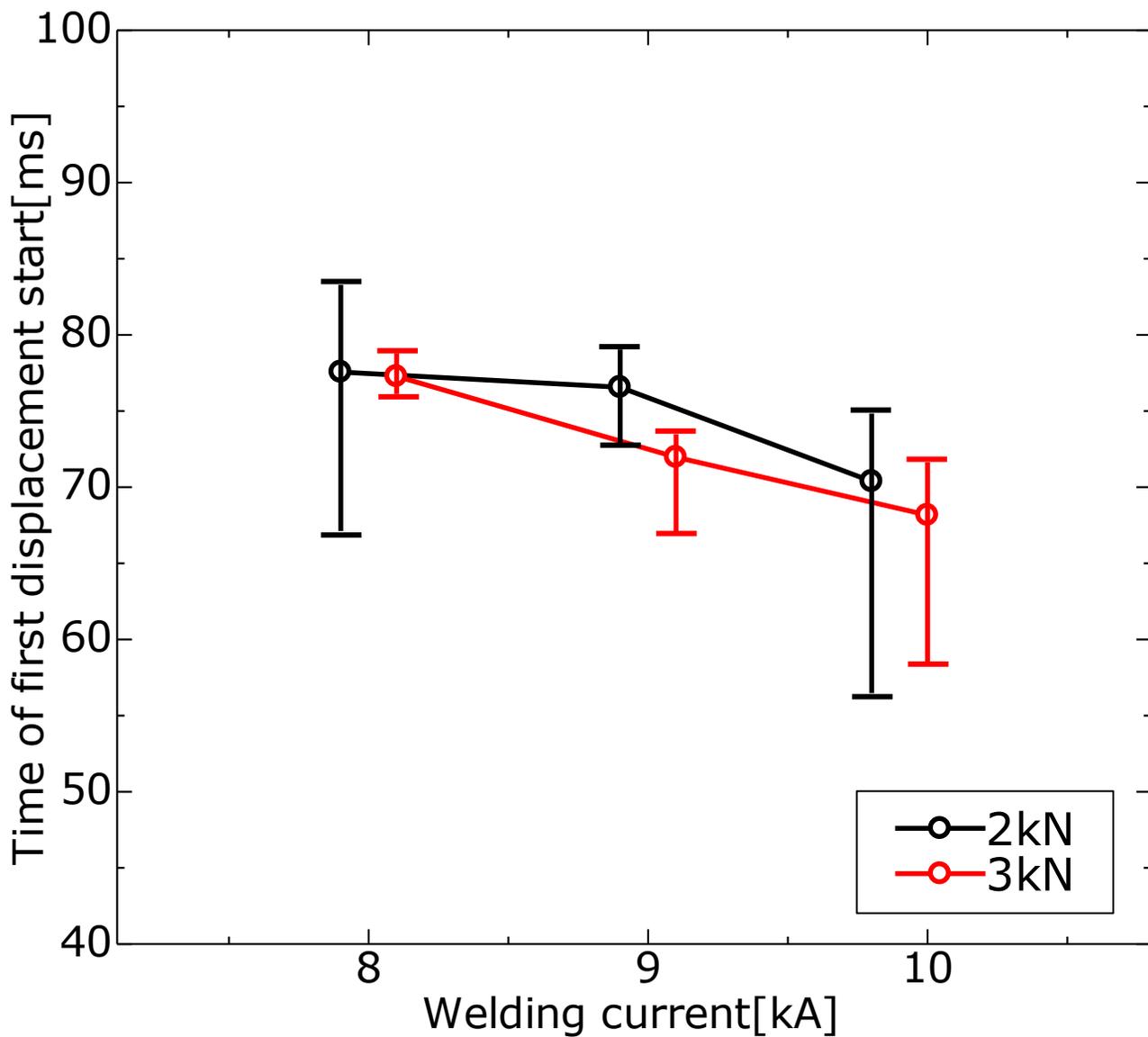


Fig.4-11 Effect of welding current on time of first displacement start using flat type

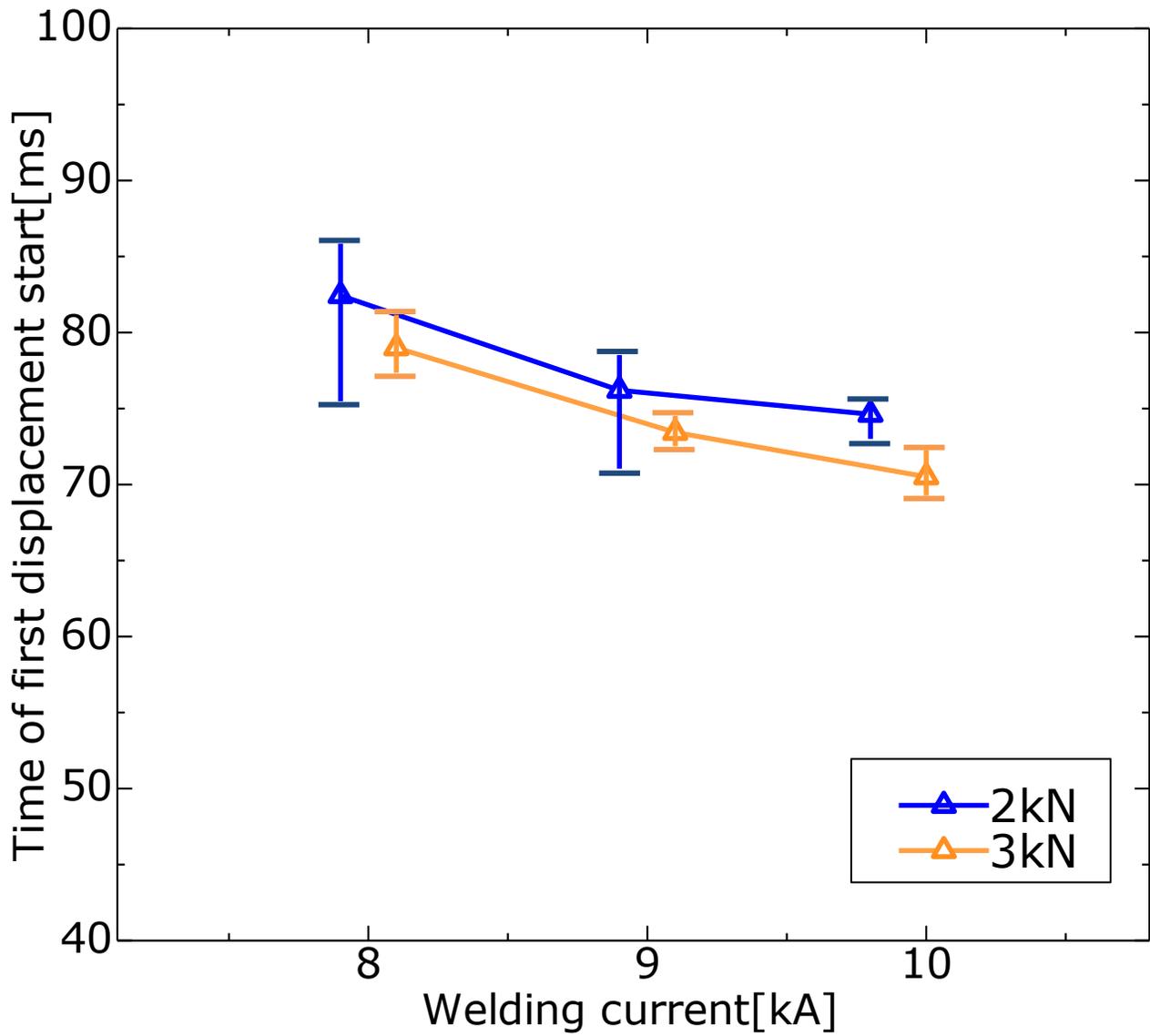


Fig.4-12 Effect of welding current on time of first displacement start using R type

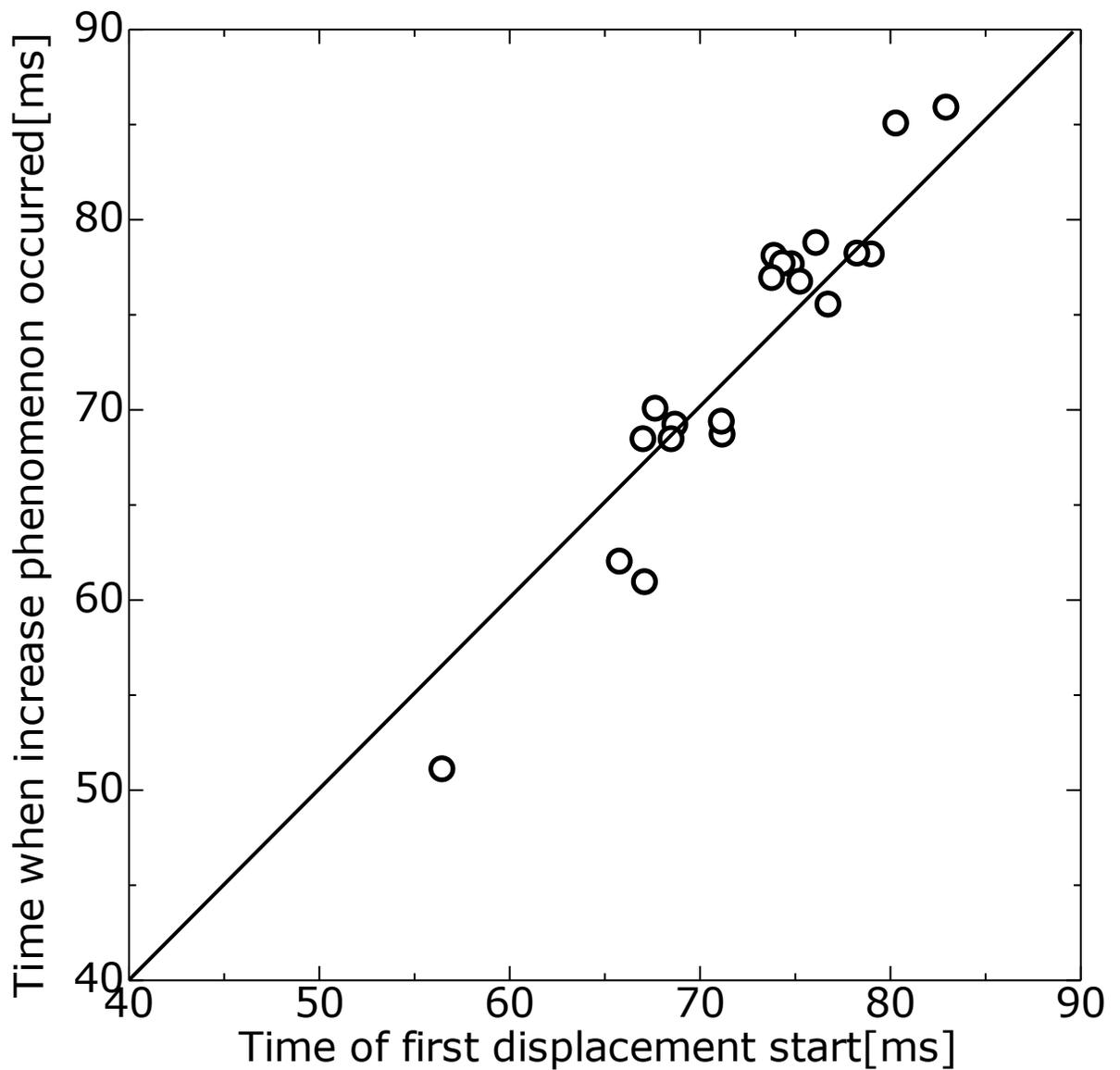


Fig.4-13 Effect of time of first displacement start on time when increase phenomenon occurred using flat type

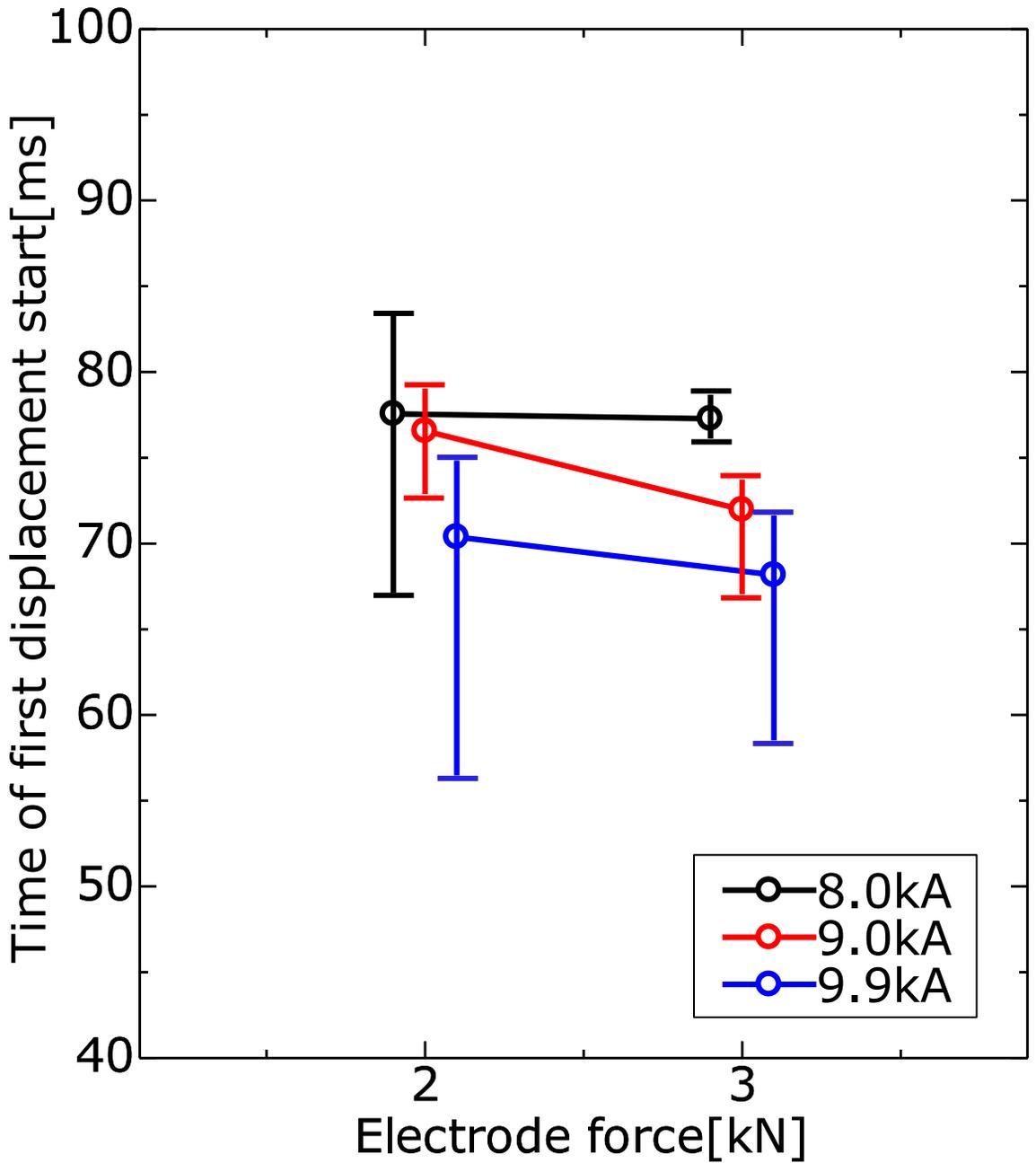


Fig.4-14 Effect of electrode force on time of first displacement start using flat type

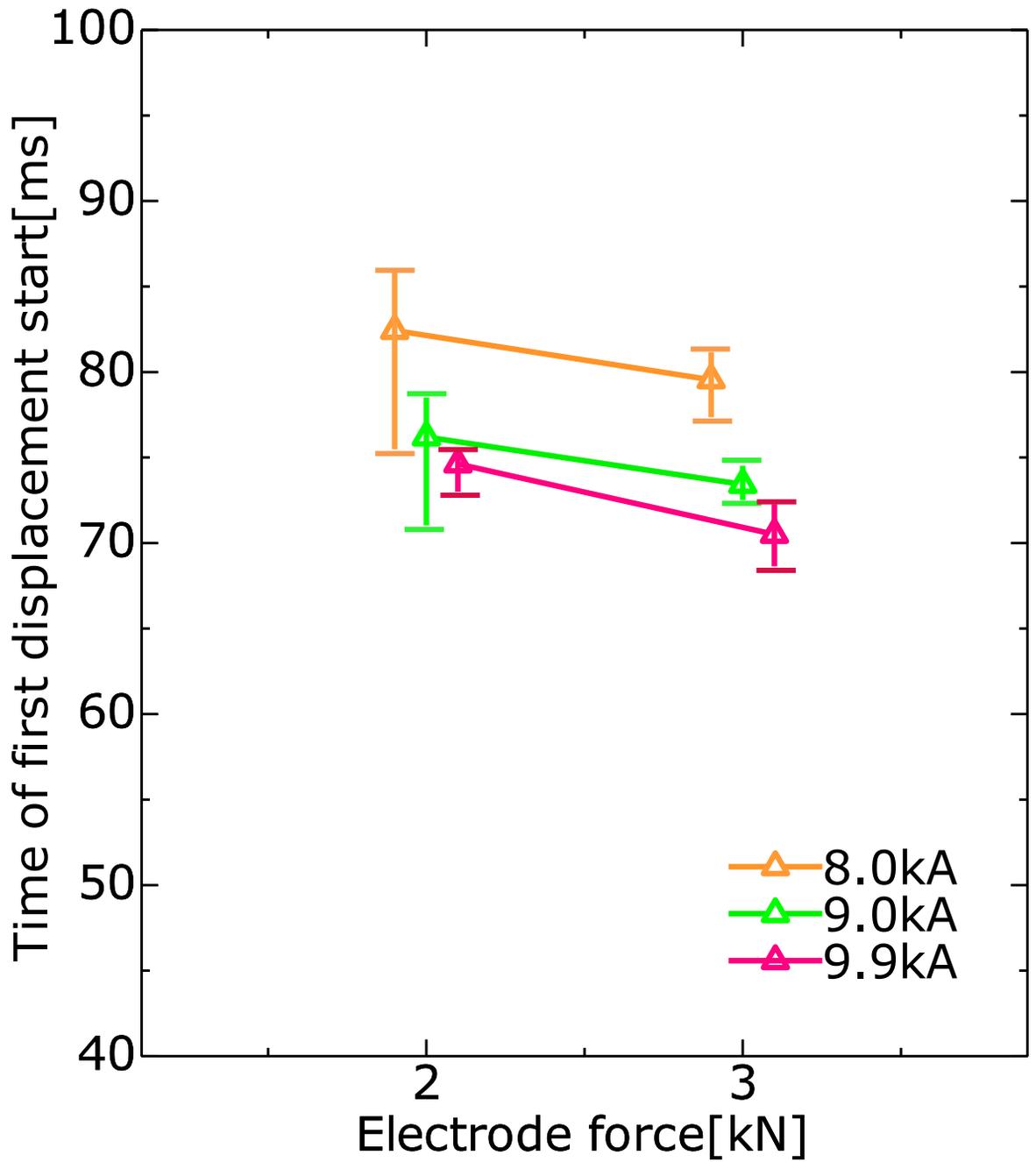


Fig.4-15 Effect of electrode force on time of first displacement start using R type

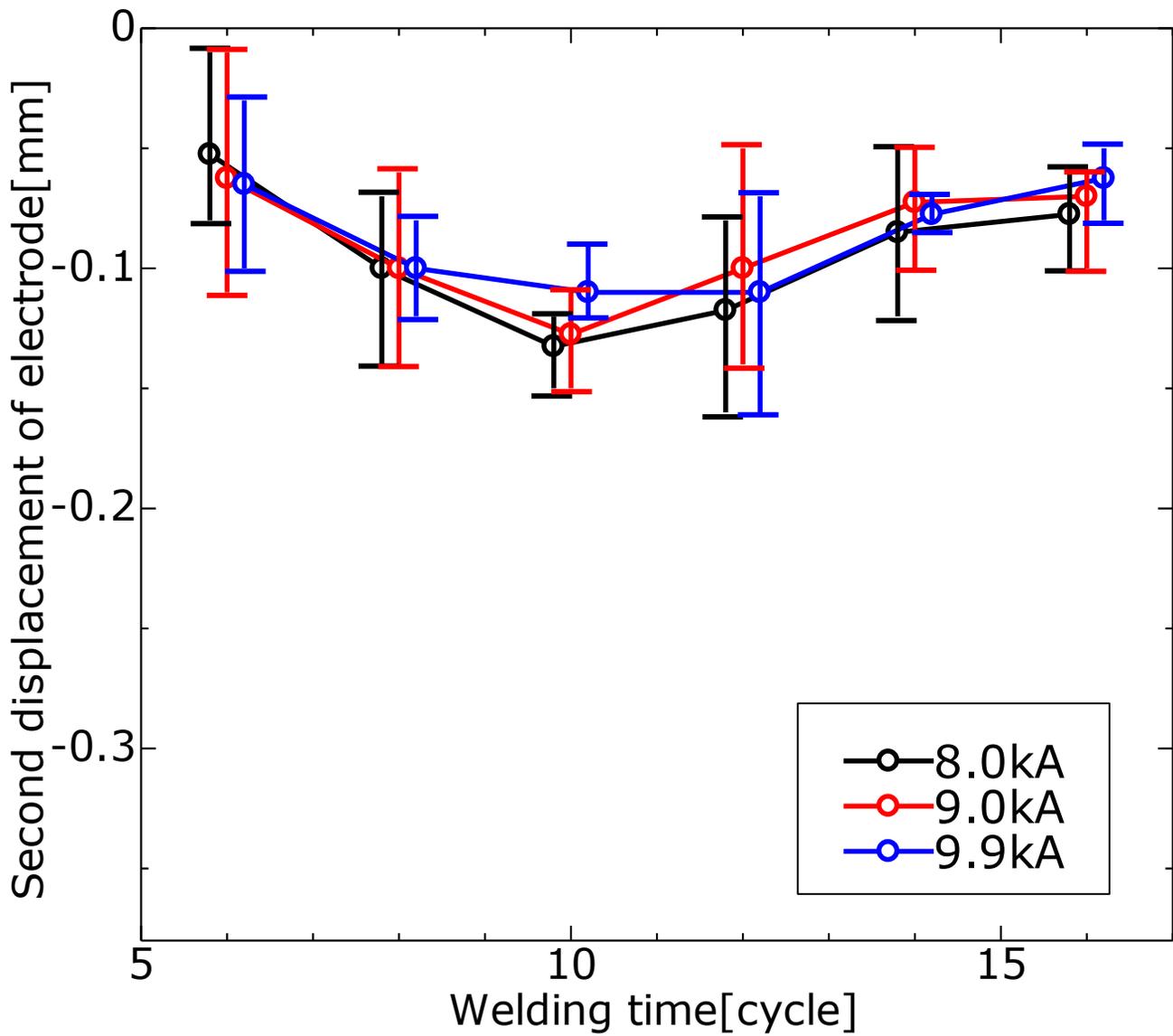


Fig.4-16 Effect of welding time on second displacement of electrode using flat type

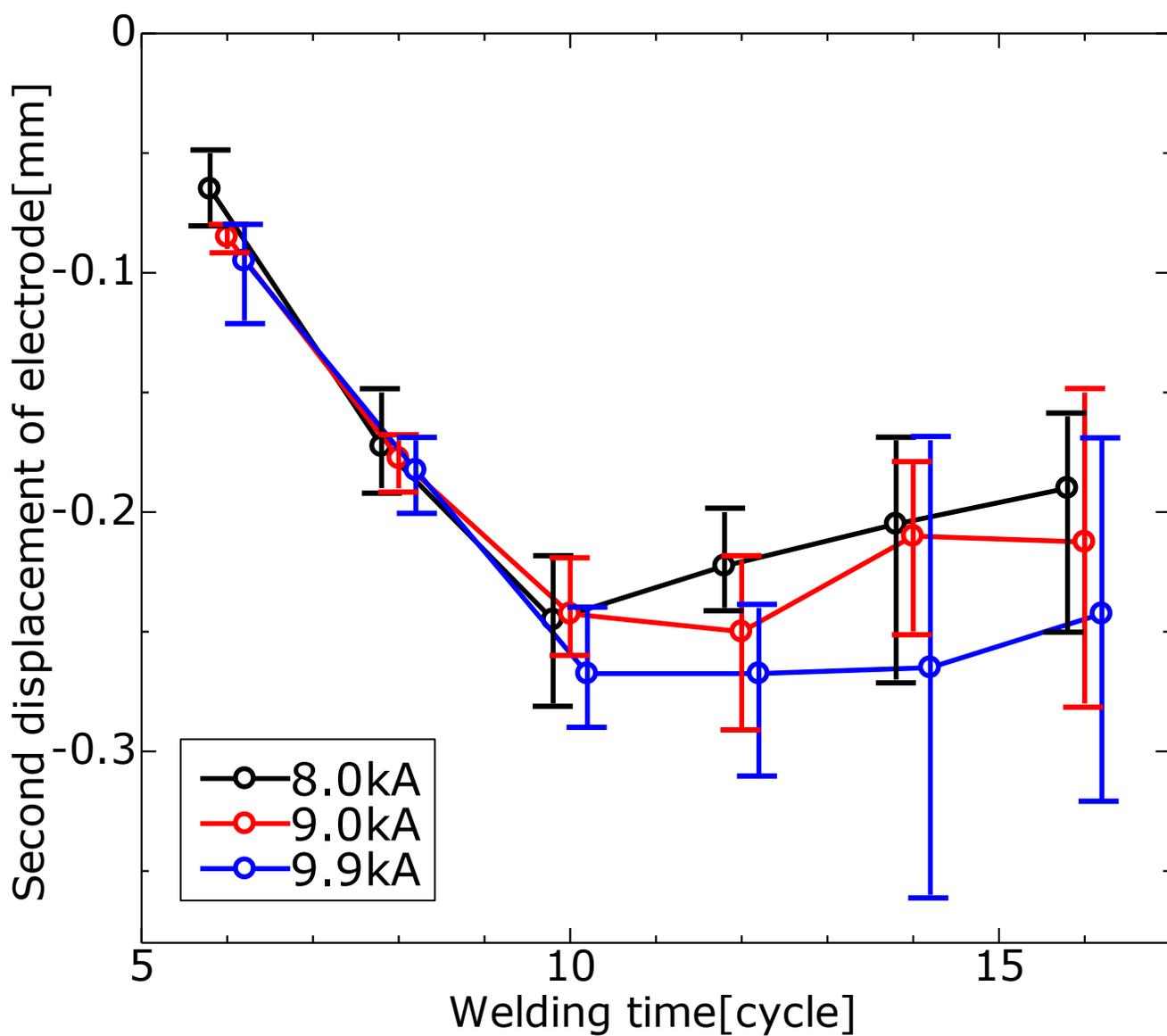


Fig.4-17 Effect of welding time on second displacement of electrode using R type

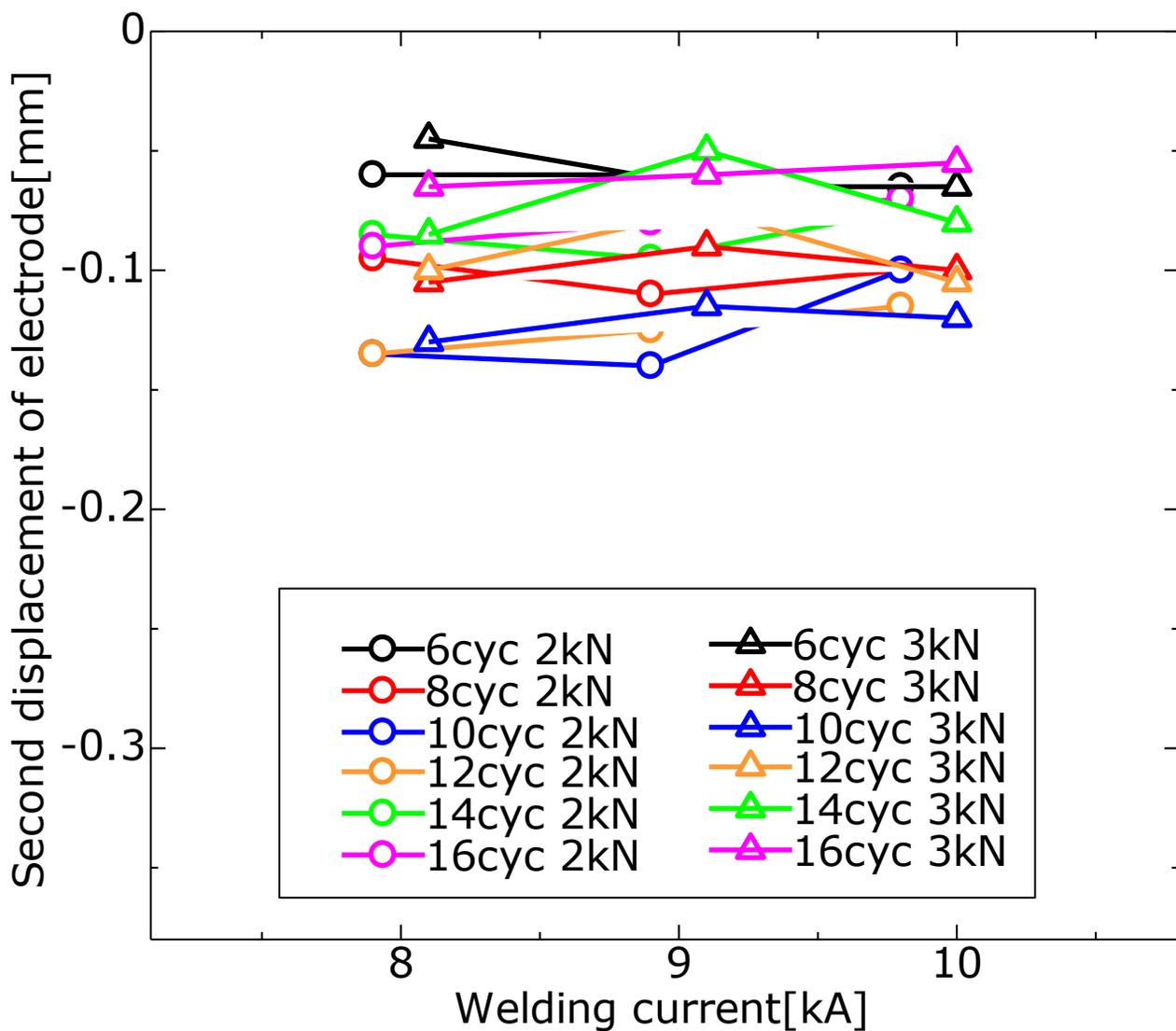


Fig.4-18 Effect of welding current on second displacement of electrode using flat type

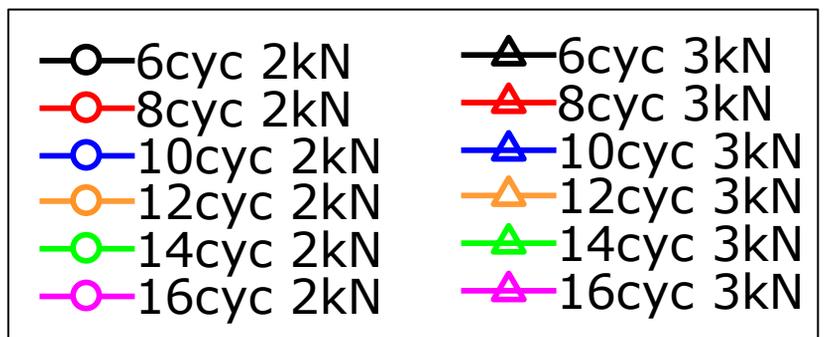
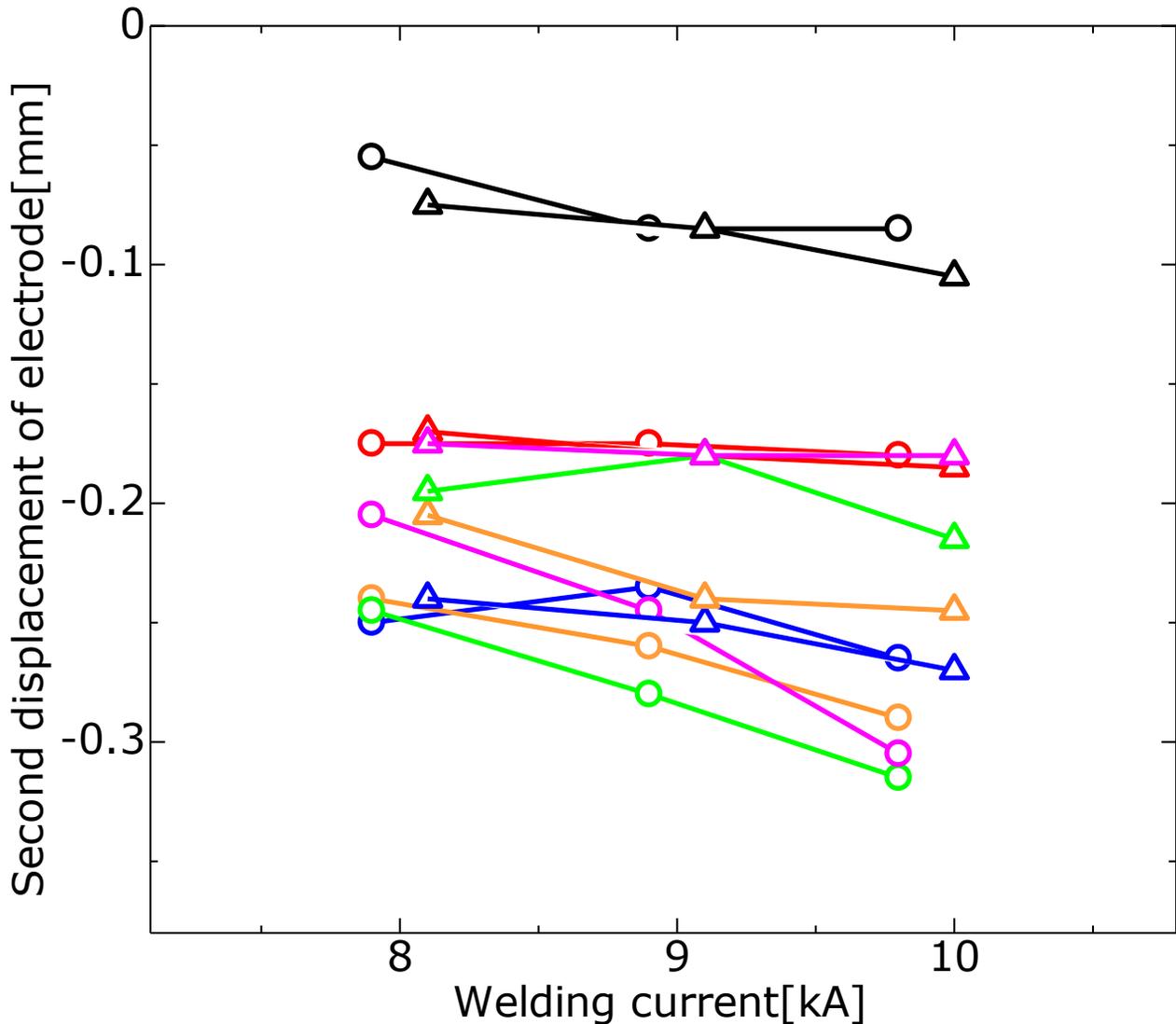


Fig.4-19 Effect of welding current on second displacement of electrode using R type

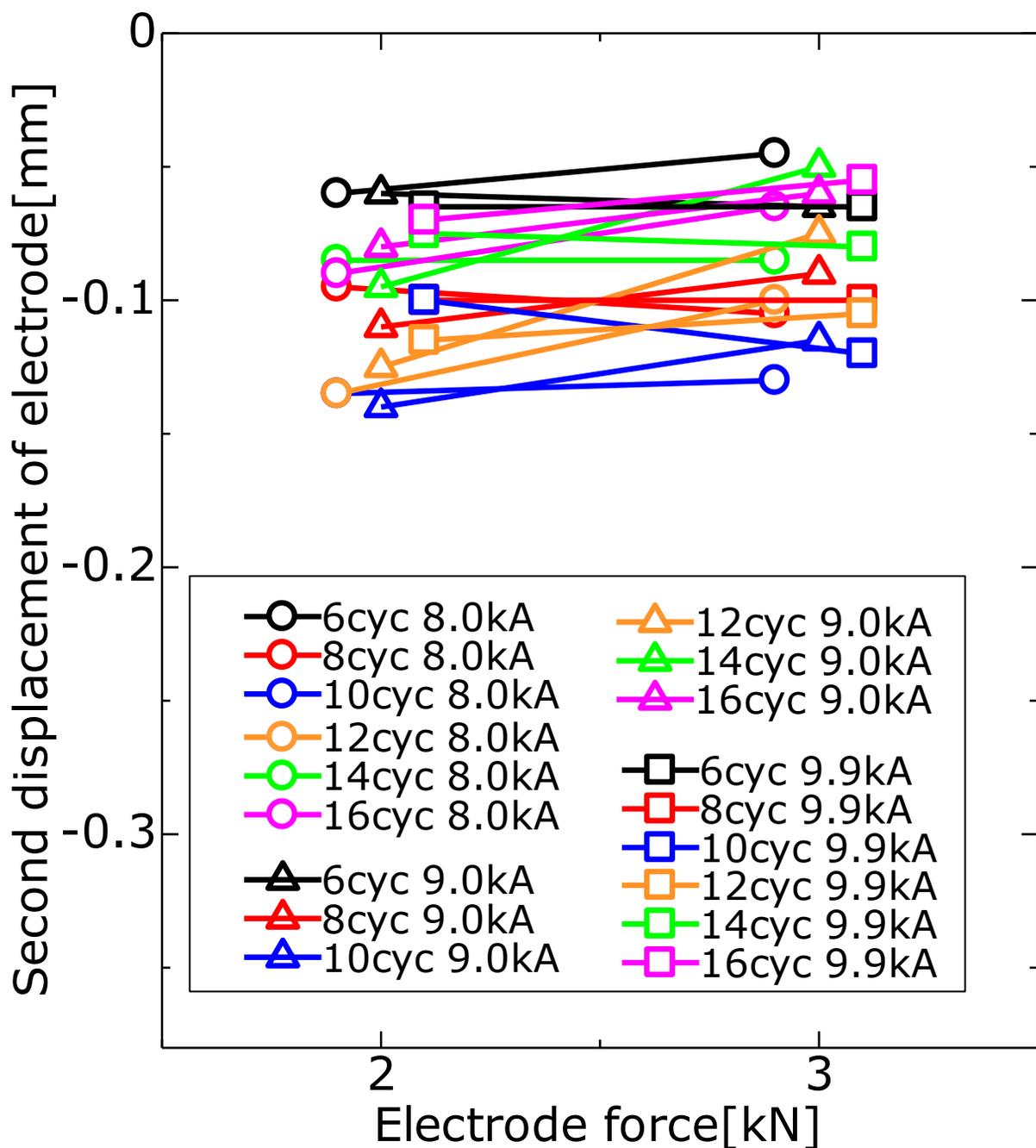


Fig.4-20 Effect of electrode force on second displacement of electrode using flat type

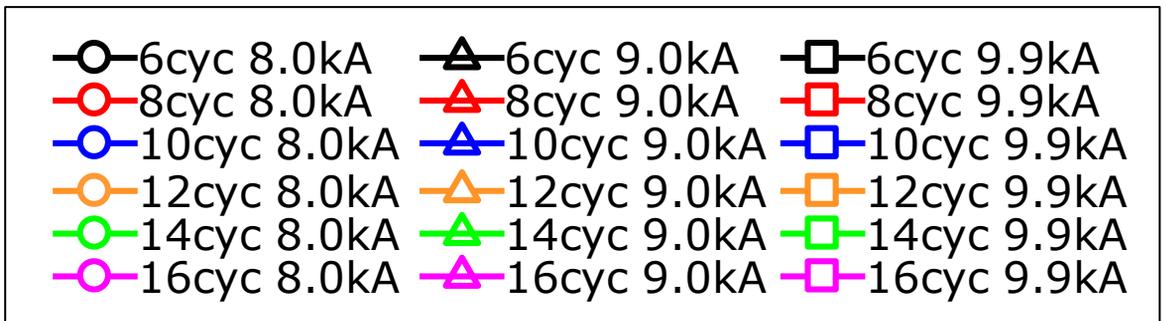
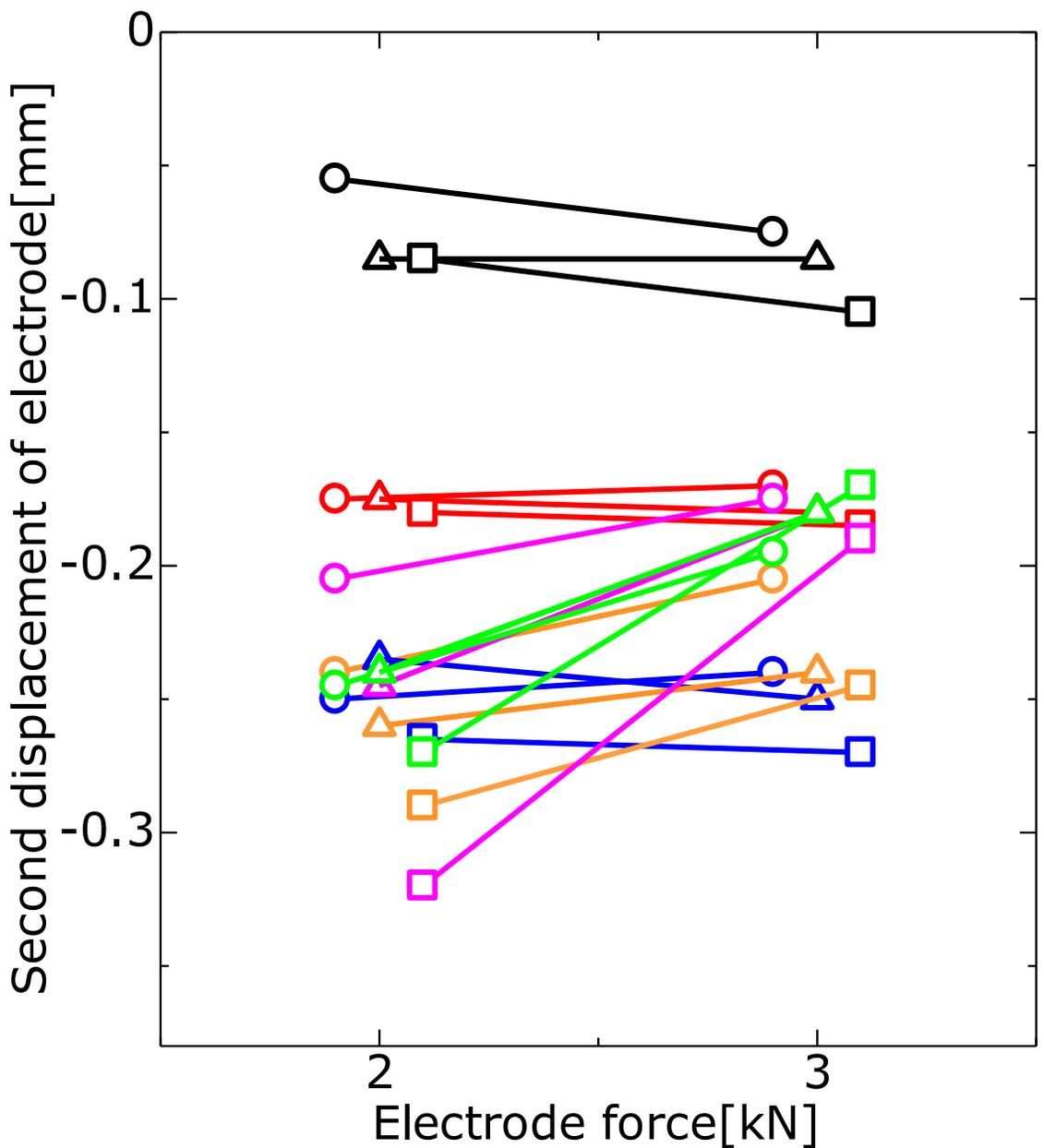


Fig.4-21 Effect of electrode force on second displacement of electrode using R type