抵抗溶接条件パラメータeqrの提案

THE PRESENTATION OF RESISTANCE SPOT WELDING PARAMETER “EQR” THAT DETERMINES WELDED JOINT TENSILE STRENGTH

野原和宏*, 山本雅也**, 中込忠男***, 青木博文****

*Kazuhiro NOHARA, Masaya YAMAMOTO, Tadao NAKAGOMI
and Hirofumi AOKI*

This study made it clear that the following parameter “eqr” can determine the tensile shear strength of resistance spot welded joint. This parameter “eqr” represents the residual heat quantity of the contact part of the welded plates after welding time. It includes spot welding current, welding time, electrode force, electrode tip diameter and welded plate thickness.

It was made it clear by experiments that the parameter “eqr” can be applied to estimate the tensile shear strength of uncoated steel and hot-dip coated steel that were the carbon steels strength class less than 490N/mm².

Keywords : Residual heat quantity, Welding current, Welding time, Electrode force, Electrode tip diameter, Tensile shear strength

残留熱量, 溶接電流, 通電時間, 電極加圧力, 電極先端直径, 引張せん断強度

1. はじめに

抵抗溶接の1点当たりの許容せん断力を求める方法が、建築基準法施行規則第1条の三第一項第一号イ、同号ロ(1)及び同号ロ(2)の認定に係る性能評価業務方法書に示す“(別記)建築物の保有水平耐力及び部材の許容耐力等の評価方法”で示されている。その中で実験で求めた保証強度の1/3を長期許容せん断力としている。

スポット溶接の引張せん断強度に関する従来の検討^{1)~3)}では、ある限られた溶接条件(電極先端径、圧力、電流、通電時間)での引張せん断強度の実験式しかない。

これらの溶接諸条件を一つのパラメータとして表現でき、そのパラメータを用いて引張せん断強度を整理できれば、実験量もへり過去の実験データから引張せん断強度も推定することができる。

このパラメータを抵抗溶接条件パラメータ eqr として提案し、その妥当性を明らかにし、板厚 1.6mm から 4.5mm の範囲で通常適用される溶接条件範囲の引張せん断強度を実験式化した。

2. 同一板厚同士の抵抗溶接の場合

2.1 抵抗溶接条件パラメータの考え方

2.1.1 発熱を支配する因子の導出

抵抗溶接部の発熱は、電極と板や板板間の接触抵抗および板内部の抵抗によるジュール発熱と電極や被溶接物への熱の逃散や空気中への熱の放散で決定されるが、発熱を支配する因子を考える上では熱

の逃散・放熱は無視して考える。

(1) 通電域を考慮しない場合の発熱支配因子

$$qt = I \cdot V \cdot ti = I \cdot (I \cdot R) \cdot ti = I^2 \cdot R \cdot ti = I^2 \cdot P \cdot ti \quad \dots (1)$$

qt: 全発熱量を表す因子 n: 指数

I: 電流 R: 電極間抵抗 ti: 通電時間 P: 加圧力

式(1)で電極間抵抗を板板間の接触抵抗が主と考え、Rを加圧力のn乗とした。その根拠は従来からの教材⁴⁾に一般的に表現されているところより採用した。加圧力が一定でも電極先端径が変われば健全な抵抗溶接ができたり、溶接されなかったりする現実を考えると式(1)は発熱支配因子とは成り得ない。

(2) 通電域を考慮した場合の発熱支配因子

通電面積を Sc として単位面積当の接触抵抗がその部分の圧力の強さ (P/Sc) のn乗であると仮定すると発熱を支配する因子は次のようになる。

$$qt = (I / Sc) \cdot \{(I / Sc) \times (P / Sc)^n\} \cdot Sc \cdot ti \\ = I^2 / Sc \cdot (P / Sc)^n \cdot ti \quad \dots (2)$$

(3) 通電域の発熱と通電終了時の通電域内残留熱量を考慮した発熱支配因子

前式(2)では通電域内の発熱量を支配する因子ではあるが、時間をかけて抵抗溶接した場合に通電域外の面内に熱が逃げた場合を表現することができない。そこで、通電時間経過後に残存している熱量の割合を残存率 rf とする。通電域内の残存熱量は次式となる。

本論文は2010年9月に日本建築学会学術講演会(北陸)において発表した内容を基に加筆したものである。

* 積水化学工業(株)住宅技術研究所 所長・博士(工学)

** 積水化学工業(株) 主任研究員

*** 信州大学建築学科 教授・博士(工学)

**** 横浜国立大学 名誉教授・博士(工学)

Director, Housing Technology Institute, Sekisui Chemical Co., Ltd., Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Sekisui Chemical Co., Ltd.
Prof., Dept. of Architecture, Shinshu University, Dr. Eng.
Emeritus Prof., Yokohama National University, Dr. Eng.

$$qr = I^2 / Sc \cdot (P / Sc)^n \cdot ti \cdot rf \quad \dots (3)$$

残存率 rf は次のように考える。本来抵抗溶接はある時間をかけて発熱させて溶接するわけであるが、残存率を求める為に電極の軸方向に瞬間線熱源が投与されたと仮定し、通電時間後に通電域内に残された熱量の比を残存率 rf とする。

瞬間線熱源 (q) が与えられた時の温度上昇は次式となる。

$$T = (q / c \rho) \exp \{ -r^2 / (4k \cdot ti) \} / (4\pi k \cdot ti) \quad \dots (4)$$

q : 瞬間線熱源投与熱量 r : 熱源からの距離

k : 熱伝導率 c : 比熱 ρ : 密度 ti : 通電時間

図1 残存熱量の考え方

図1に示すように、式(4)の瞬間線熱源投与後通電時間 ti 後に半径 rM 内に残る熱量を次のように求める。

半径 rM に時間 ti 後に残る熱量 q' を求める。

$$q' = \int_0^{rM} T \cdot c \rho \cdot 2\pi r dr \quad \dots (5)$$

式(4)を式(5)に代入して積分を実行すると次式が求められる。

$$q' = q \cdot \{ 1 - \exp(-rM^2 / 4k ti) \}$$

$rM = dc / 2$ (dc : 通電面積の直径) を代入する。

$$q' = q \cdot \{ 1 - \exp(-dc^2 / 16k \cdot ti) \}$$

$$rf = q' / q = 1 - \exp(-dc^2 / 16k \cdot ti) \quad \dots (6)$$

通電域を考慮し、残存熱量を考慮した発熱量の支配因子は式(3)に式(6)で表される rf を代入すればよい。

2. 1. 2 電極先端径 (de) と通電径 (dc) の関係

2. 1. 1の抵抗溶接部の発熱量を支配する因子の中で示した通電域の直径 dc について説明する。前述したように板板間の発熱が接合されるか否かに大きくかわる。その発熱は板板間の接触抵抗に大きく影響される。したがって、板板間の接触状態が先端電極径・板厚・加圧力でどうなるのか実験的に求める。

図2に示すように板板間に感圧紙を挟んで、圧力の作用している部分の直径を計測する。感圧紙の仕様、電極先端径、板厚、作用させる加圧力等実験条件を表1に示す。

感圧紙による圧力測定方法を図2に示す。図3は感圧紙の色調変化とそのグレースケール処理結果を示す。左側は感圧紙の色調変化、右側はグレースケール処理したものである。グレースケール処理とはカラー画像を(赤 x0.3+緑 x0.59+青 x0.11) で変換し、その階調で接触強さを表したものである。図3の右側の結果を数値的に表現すると図4のようになる。

図5は図4に示す圧力分の圧力の立ち上がる部分の直径 $dc1$ と板厚、電極先端径の関係を種々の加圧力の時も含めて表したものである。この $dc1$ を式(6)での通電径 dc とする。 dc は次式で表される。

$$dc = 0.5 \cdot de + 2.5 \cdot t \quad \dots (7)$$

表1 感圧紙による板板間圧力作用域の測定諸条件

項目	仕様および実験条件範囲
感圧紙	富士フィルム製 プレスケール(10~50N/mm ²)
板厚	1.6、2.3、3.2、4.5mm
先端電極径 (曲率半径)	直径 6,9,11,14mm (先端曲率半径 75mm)
加圧力の強さ (加圧力/電極先端投 影面積)	40.25、52.0、61.56、70.03 N/mm ²

図2 感圧紙による加圧実験模式図

図3 感圧紙とグレースケール処理

図4 圧力分布例

図5 接触部の直径 $dc1$ と板厚 t と電極先端径 de の関係

2. 2 同一板厚の場合の発熱支配因子 qr の妥当性実証

前節で抵抗溶接時の発熱を支配する因子として式(1)、(2)、(3)の3つを挙げた。どの因子が最も実用的に使えるかを実験的に求める。本章では同一板厚のメッキ鋼板について検討する。

2. 2. 1 実験条件

(1) 試験体形状、寸法、供試材料の機械的性質

実験に用いる試験体形状を図6に示す。その寸法諸元を表2に機械的性質を表3に示す。材料は400N/mm²級の溶融亜鉛-6%Al-3%Mg合金メッキ鋼板で、公称目付けが両面180g/m²、最小目付け両面140g/m²である。

図6 試験片形状

表2 試験体寸法

板厚(mm)	板幅(W)	重ね代(L)	試験片長さ(A)	クランプ間距離(B)	板厚(mm)	Yp(N/mm ²)	Ts(N/mm ²)	EL(%)
1.6x1.6	60	45	138	105	t1.6	349	467	34.2
2.3x2.3	90	60	160	120	t2.3	306	445	35.2
3.2x3.2	90	60	160	120	t3.2	304	455	36.5
4.5x4.5	90	60	160	120	t4.5	333	440	34.1

表3 供試材料の機械的性質

(2) 抵抗溶接諸条件

溶接機は2種の交流溶接機を用いた、電極はCR型で先端曲率半径75mm、電極先端径を6~14mmの間で5種とした(表4、5参照)

表4 溶接機Aの仕様

項目	製造元	型式	電極
タイマー	Pana sonic	YF-0201Z2	クロム銅、先端径φ6, 9
コンタクト		REU80003	
トランス		固定式 (~20KA)	
ガン		RTU80001	
モニタ	ダイヘン	RE-M1	

表5 溶接機Bの仕様

項目	製造元	型式	電極
タイマー	電元社	デュームスター70	クロム銅、先端径φ9,11,14
コンタクト		SN30	
トランス		M103-4175E5(B) (~28KA)	
ガン		フラジ用タイプ	
モニタ	ダイヘン	RE-M1	

表6 溶接条件水準

鋼種	板厚	電極先端径	電極先端単位面積当たりのエネルギー (kA ² ・s/mm ²)	電極先端単位面積当たりの加圧力 (N/mm ²)	溶接機・表4,5参照
ZAM 400 N/mm ²	1.6x1.6	φ6, 9	1.7, 2.1	52, 62	A
	2.3x2.3	φ6, 9	同上	同上	
	同上	φ9, 11, 14	2.0, 2.6, 3.3	41, 62, 70	B
	3.2x3.2	同上	2.2, 2.6, 3.3	同上	
	4.5x4.5	同上	2.5, 3.2, 4.0	同上	

ZAM:溶融亜鉛-6%Al-3%Mg 溶融メッキ鋼板を表す

溶接条件水準を表6に示す。同一条件のサンプル数は3である。表6に示す溶接条件水準で抵抗溶接を行い引張試験を実施した。

2. 2. 2 実験結果および考察

引張試験結果を前節で提示した抵抗溶接時の発熱量を支配する因子3つで整理を行い実用上どの支配因子が実用的かを検討する。今回実施した1.6mmから4.5mmの板厚で代表例として3.2mmの場合の結果を図7に示す。

図7は板厚3.2mmの場合の式(1)、(2)、(3)のそれぞれの場合の発熱を支配する因子と引張せん断強度との関係を示している。なお、発熱支配因子を計算する時の熱拡散係数kは鋼の100℃の値すなわちk=18.2mm²/secを用いた。指数nはマックスの値で引張せん断強度とよい相関となる値を用いた。これらのグラフによると式(3)の発熱因子がうまく引張せん断強度を整理できることが解る。他の板厚1.6, 2.3, 4.5mmの場合も同様に式(3)で整理したものを図8に示す。

(a)式(1)のqtを用いた場合

図7 発熱を支配する因子(式(1)(2)(3))と引張せん断強度 P_u の関係 ($t=3.2\text{mm}$ 、熱拡散係数 $k=18.2\text{mm}^2/\text{sec}$ 、指数 $n=-1/3$)

②通電域を考慮した発熱支配因子で整理した場合

(b) 式 (2) の qa を用いた場合

③残存熱量を考慮した発熱支配因子で整理した場合

(c) 式 (3) の qr を用いた場合

図 7 発熱を支配する因子 (式(1)(2)(3)) と引張せん断強度 P_u の関係 ($t=3, 2\text{mm}$ 、熱拡散係数 $k=18, 2\text{mm}^2/\text{sec}$ 、指数 $n=-1/3$)

(a) 板厚 $1, 6\text{mm}$ の場合の P_u - qr の関係 ($k=18, 2\text{mm}^2/\text{sec}$, $n=-3/4$)

図 8 各板厚での P_u - qr の関係

(b) 板厚 $2, 3\text{mm}$ の場合の P_u - qr の関係 ($k=18, 2\text{mm}^2/\text{sec}$, $n=-1/2$)

(c) 板厚 $4, 5\text{mm}$ の場合の P_u - qr の関係 ($k=18, 2\text{mm}^2/\text{sec}$, $n=-1/4$)

図 8 各板厚での P_u - qr の関係

図 7、図 8 の結果より、板厚 $1, 6, 2, 3, 3, 2, 4, 5\text{mm}$ の同一板厚同士の種々の抵抗溶接条件において、式(3)で表す発熱の支配因子 qr で引張せん断強度が整理できることが解る。各板厚とも qr の小さい側で多少バラツキが大きい、引張せん断強度の下限值設定したり、 qr の範囲を規定することで引張せん断強度の実験式化に利用できると考えられる。

3. メッキ、非メッキおよび強度レベルが異なる同一板厚の抵抗溶接の場合

前章では 400N/mm^2 級のメッキ鋼板の同一板厚同士の抵抗溶接について、発熱支配因子 qr の有効性を示した。本章では、非メッキの場合や強度レベルが異なった場合について、発熱支配因子 qr の修正について検討する。

3. 1 発熱支配因子 qr の非メッキ、異なる強度レベルの材料への展開

3. 1. 1 非メッキ材への発熱支配因子 qr の展開拡大

前章に示した式(3)の qr の意味を説明する為に図 9 に模式図と伴に再掲した。

図9 発熱因子 qr の意味の説明図

ここで、図9で式(3) qr の物理的意味を説明する。溶接部全体の発熱は板板間の接触抵抗による発熱と被溶接材の固有抵抗による発熱が主なものである。被溶接材の界面が接合されるか否かは界面近傍の発熱が十分か否かである。そこで、接合界面の接触抵抗による発熱に注目した。

図9の Sc は接触部の面積で①は接触部の電流密度の2乗、②の()内は加圧力を接触部の面積で除したの圧力の強さである。接触抵抗は圧力の強さの n 乗⁴⁾ なので、①と②の積が単位時間・単位面積当りの発熱である。それらに③に示す接触部の面積 Sc を掛けると接触抵抗による単位時間の発熱量全体が求められる。それらに通電時間 ti を掛けると接触抵抗による全発熱量が求められる。いくら発熱量が多くても被溶接材の板表面に平行方向に逃げる熱は接合に寄与しない。そこで前述した通電時間経過後に接触域内に残留する熱量の比率を掛けて qr として定義した。

これをもとにメッキ、非メッキの場合に qr のどの項が影響を受けるか考えてみる。

メッキ材を抵抗溶接する場合と非メッキ材を溶接する場合に経験するのは、同一溶接条件でもメッキ材の強度は低くなるという事である。定性的にはメッキが溶けて電流密度が下がるであろうということであるが、図9の各項について考える。

図9に示す①の項は電流密度の項でメッキの場合電流密度が下がり、非メッキの場合はメッキに比べ電流密度は高いものとなる。②の項は単位面積当たりの接触抵抗に影響及ぼす項であるが、メッキの溶融で通電領域が増えても単位面積当たりの接触抵抗が変化するわけではない。③の項は通電がされかつ加圧される領域に比例する項である。メッキの溶融で通電域はかわるが加圧領域が変わるわけではない。よって、メッキの有無に影響しない。最終項の残留熱量の割合は板表裏面に平行方向へ逃げる熱量の割合に関係する量なので、メッキと非メッキの影響は全く受けない。

以上の考察から、メッキと非メッキの差を図9に示す式(3)の①の項目に反映させる。よって、メッキと非メッキの差を次式の係数 α で表す。

$$qr = (I / \alpha Sc)^2 (P / Sc)^n \cdot Sc \cdot ti \cdot [1 - \exp\{-dc^2 / (16k \cdot ti)\}] \quad \dots (8)$$

式(8)のメッキと非メッキの場合の係数であるが、メッキの溶ける領域の広さで決まると考えられる。溶ける領域の広さはメッキ厚よりメッキの融点に依存すると考えられるので、亜鉛メッキ系の有無によってナゲット面積がどの程度異なるかを過去のデータから見つけ出した⁵⁾。それを図10に示す。

図10 メッキの有無によるナゲット直径の差

図10で○印と△印を比較する。両者は電流が同じでナゲット直径が飽和する通電時間で比較するとメッキ無の△印の方がナゲットの直径が約10%増大している。ナゲット面積が1.21倍になっていることが解る。このナゲット面積の増大は電流密度の増大の起因するものと考え、逆にメッキの場合通電面積が大きくなり電流密度が低下したものと考えメッキの場合の係数を $\alpha = 1.21$ とし、非メッキの場合を $\alpha = 1.0$ と仮定する。その妥当性は次節3.2で実証する。

3. 1. 2 強度レベルも考慮した qr の展開拡大

図9に示す発熱因子の説明図に戻って考える。図9の①の電流密度の項であるが、初期の板板間には塑性するほどの荷重が作用していないので強度レベルが変わっても電流密度が変化しない。初期は確かに電流密度の差はないが、通電後接触部の温度が上昇すると塑性域の広がり方が強度レベルにより異なってくる。②の項は単位面積当たりの接触抵抗であるが、前述の温度上昇時の電流密度の差はあっても単位面積当たりの接触抵抗に差はないであろう。③の項は通電され加圧される領域に比例する量なので、初期の接触状態は強度レベルの差に依存しないが、通電後の加熱時に強度レベルの低い場合は接触面積が増えると仮定し通電域も加圧される面積も増えると仮定し強度レベルに依存する項と考える。最終項の通電終了後に Sc 内に残っている熱量の割合を表すが、③の項すなわち通電され加圧され溶接される領域の残留する熱量の割合なので、強度レベルに依存する。このように考え、強度レベルを考慮する係数 β を式(8)に加え次式のようにおく。

$$qr = (I / \alpha \cdot \beta \cdot Sc)^2 (P / Sc)^n \cdot \beta \cdot Sc \cdot ti \cdot [1 - \exp\{-\beta dc^2 / (16k \cdot ti)\}] \quad \dots (9)$$

ここで $k = 18.2 \text{ mm}^2/\text{sec}$

t	1.6	2.3	3.2	4.5
n	-3/4	-1/2	-1/3	-1/4

α : 非メッキの場合 $\alpha = 1$ メッキの場合 $\alpha = 1.21$

$\beta = (400\text{N級の鋼板の引張規格強度}) /$

(他の鋼種の引張規格強度)

式(9)において β として材料の引張強度規格値の比をとったのは次のような理由である。

塑性域の大きさだと降伏点の比をとるのが筋であるが、降伏点は

鋼材が圧延される場合の圧延度合い、冷却の仕方などで規格値以上になるように品質管理される。これらが溶接熱により再加熱されるとその効果は薄れる。それに比較して引張強度はそれらの影響を受けにくいので、種々の鋼材への適用性を考え圧延度や冷却方法で影響を受けないものとした。初期の板板間の接触は強度レベルの差を受けないが、通電後の加熱時の強度レベルの差で通電領域や加圧領域の差が生じる。どの温度の強度レベルでそれらが変わるか、また、それらの温度依存性が解らないので、常温での引張強度の規格値の比をとった。これらの妥当性については次節 3.2 に示す。

3. 2 発熱支配因子 qr の非メッキ、異なる強度レベルの材料への展開の妥当性の実証

前節で抵抗溶接時の発熱支配因子の非メッキ材や強度レベルの異なる材への展開の考え方について説明した、本節ではその妥当性を実験により明らかにする。なお、試験体形状、寸法、供試材の機械的性質、抵抗溶接諸条件は次章で述べる異なった板厚同士の組合せの場合も示している。

3. 2. 1 実験条件

(1) 試験体形状、寸法、供試材料の機械的性質

実験に用いる試験体は前述の図 6 に示すもので、板厚の組合せとそれらの寸法諸元を表 7 に示す。

表 7 試験片寸法 (W, L, A, B は図 6 参照)

板厚(mm)	板幅(W)	重ね代(L)	試験片長さ(A)	クランプ間距離(B)
1.6×1.6	60	45	138	105
2.3×2.3	90	60	160	120
3.2×3.2				
4.5×4.5				
1.6×3.2				
1.6×4.5				

表 8 供試材料の機械的性質

	板厚(mm)	Yp(N/mm2)	Ts(N/mm2)	EL(%)
ZAM400	t1.6	349	467	34.2
	t2.3	306	445	35.2
	t3.2	304	455	36.5
	t4.5	333	440	34.1
ZAM490	t3.2	429	568	26.1
	t4.5	372	537	31.6
非メッキ	t1.6	293	428	40.0
	t2.3	308	426	41.0
	t4.5	290	421	47.0

400N/mm² 鋼板でメッキ、非メッキのもの、メッキ材で 400N/mm² と 490N/mm² の材料を準備。使用材料の機械的性質を表 8 に示す。メッキは溶融亜鉛-6%Al-3%Mg 合金メッキ鋼板(表中記号で ZAM と表示)で、公称目付けが両面 180g/m²、最小目付け両面 140g/m² である。

(2) 抵抗溶接諸条件

溶接機は前述した表 4、表 5 に示した 2 種の交流溶接機と電極を用いた。溶接条件の水準は表 9 に示す。

表 9 溶接条件水準

鋼種	板厚 (mm)	電極先端径 (mm)	電極先端単位面積当りのエネルギー (kJ/mm ²)	電極先端単位面積当りの加圧力 (N/mm ²)	溶接機・表 4, 5 参照
ZAM 490	3.2x3.2	φ 11, 14	2.6, 3.3	41, 62	B
	4.5x4.5	同上	3.2, 4.0	同上	
非メッキ 400	1.6x1.6	φ 6, 9	0.7, 0.9	52, 62	A
	2.3x2.3	同上	同上	同上	
	同上	φ 11, 14	1.1, 1.12	41, 62	B
	4.5x4.5	同上	1.9, 3.0	同上	
ZAM 400	1.6x3.2	φ 9, 11	2.1, 2.6	62, 70	
	1.6x4.5	同上	2.2, 2.6	同上	

ZAM:溶融亜鉛-6%Al-3%Mg 溶融メッキ鋼板を表す

非メッキ:メッキなしの黒皮除去した鋼板を表す

400 : 400N/mm² 級鋼を表す 490 : 490N/mm² 級鋼を表す

3. 2. 2 実験結果および考察

(1) メッキと非メッキの発熱因子の展開妥当性

(a) 式 (3) の qr を用いた場合の引張せん断強度の整理

(b) 式 (9) の qr を用いた場合の引張せん断強度の整理

図 11 メッキ・非メッキへの qr の展開妥当性の実証 (板厚 2.3mm)

表 9 で示す非メッキの同一板厚 2.3mm 同士の実験結果と前述した表 6 のメッキの板厚 2.3mm の実験結果を従来の qr の式 (3) (係数 α 、 β を考慮しない式 (3) = 式 (9) で α 、 β とも 1 を代入したもの) で引張せん断強度を整理したものを図 11 の (a) に示す。 qr の値が 0.04 から 0.07 の付近で非メッキとメッキのデータが乖離している。一方、式 (9)

で示すメッキ、非メッキを考慮した係数 α をメッキ、非メッキで変えた qr で整理したのが図 11 の (b) である。(a) で見られたようなメッキ、非メッキでの乖離はない。表 9 で示す 1.6mm、4.5mm の板厚の場合も同様の効果がみられた。図 11 以降類似グラフの縦軸 $Pu/\sigma u$ の単位は mm^2 。

本章以降の実験結果と考察については、強度レベルを変えた材料での検討等加えるので、各グラフの縦軸の引張せん断強度 Pu は材料の引張強度ミルト値 σu で除した値を用いる。

(2) 強度レベルが異なる材料への発熱因子の展開妥当性

表 9 で示す 490N/mm² 級メッキ鋼板の同一板厚同士の板厚組合せの実験結果と表 6 で示した 400N/mm² 級メッキ鋼板の実験結果をせん断強度に関して式 (3) で整理したものと式 (9) で整理したものを比較する。

実験は表 9 で示すように板厚 3.2mm 同士のものと 4.5mm 同士のものの 2 種を実施したが、傾向は変わらないので板厚 3.2mm 同士の板厚の場合について比較を示す。

(a) 式 (3) の qr を用いた場合の引張せん断強度の整理

(b) 式 (9) の qr を用いた場合の引張せん断強度の整理

図 12 強度の異なる鋼板への qr の展開妥当性の実証 (板厚 3.2mm)

図 12 の (a) と (b) を比較するとやや式 (9) で整理した (b) の方がまとまりがあるように思えるが顕著な差はない。強度レベル温度依存性やどの温度の強度差が効くのか不明なため、今後の研究に期待するとして、発熱支配因子は式 (9) のままとする。

4. 異なった板厚の抵抗溶接の場合

前章までで、メッキ、非メッキ、強度レベルの異なる同一板厚同士の抵抗溶接の場合の引張せん断強度を支配する発熱因子 (式 (9)) について考え方とその妥当性を検証してきた。

本章ではその発熱因子 (式 (9)) を異なる板厚の抵抗溶接に展開する考え方とその妥当性検証をする。

4.1 発熱支配因子 qr の異なる板厚組合せの抵抗溶接への展開の考え方

式 (3) 式 (9) に示した発熱支配因子の残留熱量の考え方は、電極軸の方向に瞬間線熱源を投与したと考える導いた式である。異なった板厚の抵抗溶接で考慮されていない点は次の 2 点である。

図 13 で説明する。まず板厚 $t1$ と $t2$ を溶接する場合板厚に差があれば、実際の溶接部は薄板 $t1$ 同士の溶接よりも余分な熱量を消費する。すなわち、溶接に寄与する発熱量は図 13 の (a) に示すより少なくなる。この補正を熱量補正と呼ぶ。次の点は図 13 の (c) に示すように実際の抵抗溶接では電極軸に垂直方向のみならず軸方向にも熱が逃げていく為軸方向すなわち板厚方向への温度分布が生じる。これで合計板厚中心の温度と溶接される界面の温度差ができ溶融域の広さや最高温度の差が生じてくる。これを補正することを温度分布補正と呼ぶ。

図 13 発熱支配因子 qr の補正 (異なる板厚の場合)

板厚が異なる場合の抵抗溶接の溶融域のうち強度を確保する為の必要溶融域は薄板側への板厚方向への深さで充分であろう。したがって、熱量の補正としては次式となる。

$$\text{熱量補正係数 } A = 2t1/(t1+t2) \quad \dots (10)$$

温度分布補正は次のように考える。

$t1$ と $t2$ の合計板厚と同じ同一板厚の抵抗溶接を想定して、温度分布を考える。解析解として一般にあるものを適用して温度分布を仮定する。すなわち、電極と板間は常に 0°C に維持され常に板板間が発熱する場合の定常状態の温度と同じと仮定すると図 14 のように表され、板板間の温度を $Tm0$ とすると電極板間を 0°C とした 2 次

曲線で表される。式で表すと次式のようなになる。

$$T(z)=Tm0 \left(1 - z^2/t0^2 \right) \quad t0=(t1+t2)/2 \quad \cdots (11)$$

図 14 電極板間 0℃、板板間常発熱の定常温度分布

式(10)より合計板厚中心と板厚 $t1$ と板厚 $t2$ の界面の温度を合計板厚中心の温度 $Tm0$ の比 $B1$ は次式となる。これを温度上昇の補正係数 $B1$ とする。

$$B1=Tm1/Tm0=1 - \{(t1+t2)/2 - t1\}^2 / \{(t1+t2)/2\}^2 \quad \cdots (12)$$

次に、合計板厚中心の溶融域の直径 $d rn0$ と板厚 $t1$ と $t2$ の界面の溶融域の直径 $d rn1$ の比を補正係数を考える。

溶融域の拡がりは最高到達温度が溶融温度以上となる領域である。電極軸に仮に瞬間線熱源 qm を投与した時の最高到達温度 $Tmax$ は次式(13)で表される。

$$Tmax=0.117 \left(qm / c \rho \right) / r^2 \quad \cdots (13)$$

ただし、 c : 比熱 ρ : 密度 r : 熱源からの距離

溶融温度を TM としその時の熱源からの距離を rm とすると次式となる。

$$rm^2=0.117 \left(qm / c \rho \right) \cdot TM \quad \cdots (14)$$

rm に $d rn0/2$ と $d rn1/2$ を代入しその時の仮の瞬間熱源投与量を $qm0$ と $qm1$ とすると $d rn0$ と $d rn1$ の 2 乗の比は次式となる。

$$(d rn1/d rn0)^2=qm1/qm0 \quad \cdots (15)$$

$qm1$ と $qm0$ の比は、式(4)に示すように温度上昇に比例する。また、式(12)の板厚 $t1$ と $t2$ の界面温度 $Tm1$ と合計板厚中心の温度 $Tm0$ の比で表すと式(15)は次式 (16) となる。これは板厚方向の温度分布を電極軸に投与した仮の瞬間熱源投与に置き換えた他にならない。

$$(d rn1/d rn0)^2=qm1/qm0 = Tm1/Tm0 \quad \cdots (16)$$

式(16)は溶融面積の比になる。この溶融面積による補正係数を $B2$ とおく。すると、合計板厚中心と板厚 $t1, t2$ の界面の温度上昇の補正と溶融面積の補正を総合した補正係数 B は次式となる。

$$B=B1 \times B2 = (Tm1/Tm0)^2 \quad \cdots (17)$$

以上の議論から、異なる板厚の場合の発熱支配因子は次式 (18) のようになる。これを有効発熱因子 eqr と呼ぶこととする。

$$eqr=qr \cdot A \cdot B \quad \cdots (18)$$

ただし、 qr : 式 (9) A : 式 (10) B : 式 (17)

4. 2 発熱支配因子 qr の異なる板厚同士の抵抗溶接への展開の妥当性の実証

4. 2. 1 実験条件

試験体形状は前前章の図 6 に示したもので、その寸法、供試材料の機械的性質は前章に示した表 7 と 8 の板厚 1.6mm と 3.2mm および 1.6mm と 4.5mm の組合せの 400N/mm² 級 γ 鋼である。

溶接諸条件の水準は表 9 の異板厚組合せの条件である。

4. 2. 2 実験結果および考察

実験結果を同一板厚での発熱支配因子 qr (式(9)) で引張せん断強度を整理したものと異板厚での有効発熱支配因子 eqr (式(18)) で整理したものを比較するが、両式とも qr の計算時に初期の板板間の接触部の直径 dc をどう設定するか、接触抵抗に関する指数 n をどうするかを次に検討する。

板板間の初期接触部の直径 dc であるが、異なる板厚の場合加圧時の両方の板の変形が接触部の直径に寄与すると考え平均的板厚を式(7)に代入するか、薄板側の変形が大きいため、薄板側の板厚を代入するかであるが、種々の板厚組合せで前者が式(7)によくマッチした、その結果を図 15 に示す。図中の $dc1$ は図 4,5 と同じ定義で dc 式(3)、式(9)の dc に対応するものである。

図 15 接触部の直径 $dc1$ ($=dc$) と板厚 t との関係 ($t=(t1+t2)/2$ の場合)

接触抵抗に関連する指数 n であるが、次のように考える。もともと指数 n は各板厚同士の抵抗溶接で引張せん断強度を整理するに適した値を設定したので、同様に引張せん断強度が比較的良好に整理できるものとして、次のように設定した。 dc も示すと次式となる。

$$\begin{aligned} \text{指数 } n &= (\text{板厚 } t1 \text{ 同士の係数 } n + \text{板厚 } t2 \text{ 同士の係数 } n) / 2 \\ dc &= 0.5de + 2.5t \quad t=(t1+t2)/2 \quad \cdots (19) \end{aligned}$$

同一板厚同士の発熱支配因子 qr で整理すると図 16 (a) のようになり、一本の曲線上にのっているとは言い難い。また、 qr に補正係数 A のみをかけて整理しても図 16(b) のようになり一本の曲線上に乗るとは言い難い。

5. 引張せん断強度の発熱支配因子 eqr を利用した引張せん断強度の実験式化と eqr の展開可能性

(1) 実験式化

2 章～4 章で引張せん断強度への非メッキ・メッキの影響、強度レベルの影響、板厚が異なる場合の影響を検討し、発熱支配因子 eqr で引張せん断強度が整理できることが明らかとなった。

2 章から 4 章のすべての結果より、抵抗溶接の引張せん断強度を発熱支配因子 eqr で整理した実験式を表 10 に示す。

表 10 引張せん断強度 P_u の発熱支配因子 eqr による実験式化

板厚 組 合 せ (mm・mm)	電極先端直径 (mm)	発熱支配因子 eqr (式 (18)) の適用範囲 (N/mm ²) $KA^2 \cdot \text{sec/mm}^2$	引張せん断強度の実験式 (N/(N/mm ²)=mm ²)
1.6 x 1.6, 2.3, 3.2, 4.5	6~9	0.008~0.0184	$P_u/\sigma_u = 40 \cdot \ln(eqr) + 215$
2.3 x 2.3, 3.2, 4.5	6~14	0.03~0.105	$P_u/\sigma_u = 39.5 \cdot \ln(eqr) + 177$
3.2 x 3.2, 4.5	9~14	0.098~0.263	$P_u/\sigma_u = 50 \cdot \ln(eqr) + 195$
4.5 x 4.5	9~14	0.196~0.373	$P_u/\sigma_u = 108 \cdot \ln(eqr) + 270$

表 11 溶接諸条件例

適用鋼種	板厚 (mm)	de (mm)	P (N)	I (KA)	ti (sec)
400, 490 N/mm ² 級メッキ	1.6x1.6	6	1470~1740	6.2~8.7	1.24~0.76
		9	3310~3920	7.7~10.3	1.82~1.24
	2.3x2.3	6	1470~1740	6.2~8.7	1.24~0.76
		9	3310~4460	7.7~11.9	1.82~1.24
		11	3920~6660	9.6~15.5	2.17~1.30
		14	6350~10800	11.8~19.0	2.25~1.40
	3.2x3.2	9	3920~4460	8.7~13.0	1.82~1.24
		11	3920~6660	9.8~15.5	2.17~1.30
		14	6350~10800	12.2~19.0	2.25~1.40
	4.5x4.5	9	3920~4460	8.3~13.5	2.30~1.40
		11	3920~6660	9.5~14.5	2.64~1.81
		14	6350~10800	12.6~18.5	2.41~1.80
	1.6x3.2	9	3920~4460	8.5~10.3	1.82~1.24
		11	4460~6660	10.7~10.9	2.17~1.65
	1.6x4.5	9	3920~4460	8.7~10.6	1.82~1.24
		11	5850~6660	9.8~11.2	2.17~1.65

de : 電極先端直径 I : 設定電流 ti : 通電時間 電極先端曲率半径: 75mm

表 10 中 σ_u は材料引張強度で、 $\ln$ の値を用いる。発熱因子 eqr は式 (18) で、各板厚や溶接条件を代入して求める。なお実験式は、各 eqr の下限レベルを結んだ線である。 eqr に適用範囲を設けたのは次の理由である。適用範囲より eqr の小さい側は同じ eqr でも溶接条件で強度が多少異なり、下限レベルを設定しても過剰な条件設定となる。 eqr の大きい側は表 10 に示した範囲外でも適用できると考えられるが、チリの発生など他の要因で溶接不可となると予想されたので実験での上限範囲とした。なお、図 16 中の実線は表 10 の最上欄の薄板側板厚 1.6mm の場合の実験式を表す。

表 10 を使うに当たり、実際どのような溶接条件範囲で eqr を設定すればよいか解らないので、2 章から 4 章の実験で用いた溶接諸条件を表 11 に示す。表 11 は 2 章から 4 章のすべての実験での溶接諸条件範囲なので表 10 で示した eqr の範囲外のものも含む(小さい側)。

表 10 の実験式は電極損傷を考慮したものではないので、実ライン適用時はこの実験式から求めた eqr の 20~30% 増しの eqr に設定し実ラインで適用しながら電極交換またはドレッシング間隔を決めればよい。

(a) 式 (9) による引張せん断強度の整理

(b) 式 (9) eqr に補正係数 A をかけて引張せん断強度を整理した場合

(c) 式 (9) eqr に補正係数 A と B をかけた式 (18) により引張せん断強度を整理した場合

図 16 異なる板厚で引張せん断強度の式 (9) 式 (18) による整理の比較

図 16 (c) は式 (9) の eqr に補正係数 A, B をかけた場合でメッキ・非メッキの場合の同一板厚 1.6mm の場合と薄板側板厚 1.6mm の異板厚の場合のデータをプロットしている。種々のデータはうまく 1 本の曲線上に乗っている。これは式 (18) に示した異板厚の発熱支配因子の有効性を示している。

(2) eqr の展開可能性

① (1) の実験式の適用範囲

【メッキ種について】

実験式は非メッキ黒皮なし、溶融亜鉛-6%A1-3%Mg 合金メッキ鋼板の実験を基にしたものである。補正係数 α はメッキの融点に依存するので、融点が大きく異なるメッキ鋼板には適用できない。よって、溶融亜鉛メッキ、溶融亜鉛-5%A1 合金メッキ、溶融亜鉛-11%A1-3%Mg-0.2%Si 合金メッキ等メッキの融点あまり変わらないメッキまで適用拡大できる。

【鋼種について】

通常用いられる建築用の軟鋼・高張力鋼 (50, 60 和鋼等) 等の強度の温度依存性の変化率があまり変わらなければ適用できると考えられる。接触面積はヤング率があまり変わらなければ影響うけないこと、熱伝散係数 k も変わらないことから推定される。ただ、耐火鋼等は強度の温度依存性がこれらと異なるため適用には確認が必要と思われる。

【板厚について】

溶接条件の目安を得るには実験式を 6mm 厚程度まで拡大してもよいと考えられるが、圧力の強さから接触抵抗に換算する時実験により指数 n を求めているので、 n を実験で求めるとより正確となる。

② eqr の展開

他の材料 (化学組成、強度レベル等)、板厚でも接触面積 S_c を板厚と電極先端径で実験式化し、接触抵抗を決める指数 n を実験的に求めれば溶接諸条件を統括して扱えるパラメータになる。メッキの補正係数 α も融点の異なるメッキ種で検討すればより展開範囲は増える。

6. まとめ

(1) 熱伝導の解析解に注目し、抵抗溶接の発熱支配因子 qr を明確にし、同一板厚の 400N/mm² 級のメッキ鋼で溶接後の引張せん断強度がうまく整理できることを明らかにした。

(2) 発熱支配因子 qr を非メッキ黒皮無し材、490N/mm² への展開の考え方を提案し、その妥当性を実験で明らかにした。

(3) 異なった板厚への補正の考え方を提案し、それを発熱支配因子 eqr とし、その妥当性を実験で明らかにした。

(4) これらの結果を踏まえ、発熱支配因子 eqr を用いて抵抗溶接部の引張せん断強度 P_u を実験式化した。

この発熱支配因子 eqr を抵抗溶接条件パラメータと呼ぶこととする。

謝辞

本研究は「市街地住宅等供給効率化事業」の一環であり、「建築用薄板溶接接合部設計施工指針作成小委員会 (委員長: 青木博文) /WG3 (中込忠男)」の委員会活動として実施したことを記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 及川初彦他: 鋼とアルミニウムのスポット溶接に及ぼす各種因子の影響, 溶接学会論文集, 第 14 巻, 第 2 号, pp267~277, 1996
- 2) 樺沢真事他: 薄鋼板スポット溶接継手の引張せん断強さの推定, 溶接学会論文集, 第 14 巻, 第 4 号, pp754~761, 1996
- 3) 佐久間康治他: スポット溶接部静的強度の支配因子とそれにもとづく溶接強度特性の優れた高強度鋼板メニューの展開, 新日鉄技報, 第 378 号, 2003
- 4) 浜崎正信: 重ね抵抗溶接, 株式会社 産報, 1971
- 5) 溶接学会抵抗溶接研究委員会: 抵抗溶接現象とその応用 (I) スポ