

第2章 すみ肉溶接についての文献調査

2-1 各種設計基準の比較

すみ肉溶接のサイズについて設計基準をいくつか調べてみると次のようになる。

(道示との相違点をアンダーラインで示す)

1) 道路橋示方書 (日本道路協会 1996年)

①等脚すみ肉とするのを原則。

②主要部材の応力を伝える場合 $S \geq 6\text{mm}$ で 次式の満足を標準とする。

$$t_1 > S \geq \sqrt{2t_2}$$

S: サイズ、 t_1 : 薄い方の母材厚さ、 t_2 : 厚い方の母材厚さ

2) 鉄道構造物設計標準・同解説 (鉄道総合研究所 1992年)

①等脚すみ肉とするのを原則。

②主要部材の応力を伝える場合 $S \geq 6\text{mm}$ で なるべく次式を満足する。

$$t_1 \geq S \geq \sqrt{2t_2}$$

③フランジプレートと腹板を連結する溶接はすみ肉溶接とし、そのど厚の合計は腹板の厚さ以上とするのを原則とする。

④構造上、厚い板が用いられ、腹板に作用するせん断応力度が十分小さい場合、規定の照査をへて腹板の厚さ以下に低減できる。 但し上記②式の制限を受ける。

3) 鋼構造設計規準(日本建築学会 1990年)

①すみ肉サイズは薄い方の母材の厚さ以下でなければならない。

② $t_1 \leq 6\text{mm}$ のとき (T継手に限る)

Sは t_1 の1.5倍または6mmまで増すことができる。

③ $t_1 > 6\text{mm}$ のとき

$4\text{mm} \leq S$ 且つ $1.3\sqrt{t_1} \leq S$ でなければならない。

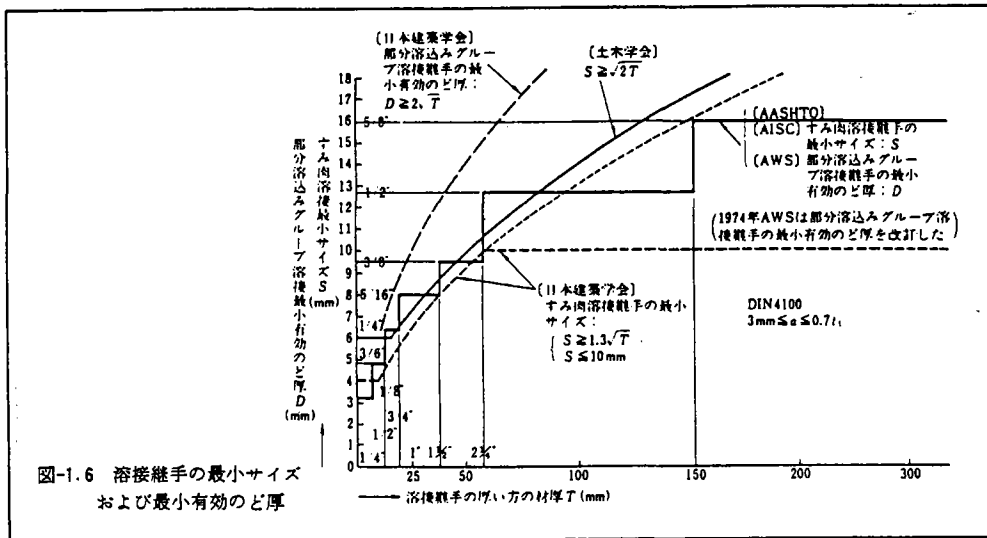
④ $S \geq 10\text{mm}$ のときはこの限りでない。

⑤Sの最大値規定はない。

4) AWS(Structural Welding Code 1992)

	Minimum Size
$T \leq 6.4$	3 mm
$6.4 < T \leq 12.7$	5 mm
$12.7 < T \leq 19.0$	6 mm
$19.0 < T$	8 mm

これらから共通に言えることは細部の違いはあるものの、基本的に溶接部の急冷割れを念頭に最小サイズを規定していることである。また鋼構造接合資料集成(3) (日本鋼構造協会、鋼材倶楽部編)によると、下表のように各種基準に対する $\sqrt{2t}$ の位置づけが読み取れ、総じて道示規定は平均的なものとなっていることがわかる。



2-2 $\sqrt{2t}$ の決定根拠

1) 主な道路橋設計規準の変遷

我が国の道路橋の設計規準は概ね次の段階を経て現在の道示に至っている。

明治 19 年	内務省訓令	「国県道の築造標準」
	↓	
大正 15 年	内務省令	「道路構造に関する細則案」
	↓	
昭和 14 年	内務省土木局	「鋼道路橋設計示方書案」
昭和 14 年	附 録	「鋼道路橋製作示方書案」
	↓	
昭和 15 年	内務省土木局	「電弧溶接鋼道路橋設計示方書案」
	↓	
昭和 31 年	建設省道路局長	「鋼道路橋製作示方書」
	↓	
昭和 32 年	建設省道路局長	「溶接鋼道路橋示方書」
	↓	
昭和 39 年	建設省道路局長	「鋼道路橋設計・製作示方書」
昭和 39 年	建設省道路局長	「溶接鋼道路橋示方書」
	↓	
昭和 47 年	日本道路協会	「道路橋示方書・同解説」 (S 39 年版の大幅改定)
	↓	
昭和 55 年	日本道路協会	「道路橋示方書・同解説」
	↓	
平成 8 年	日本道路協会	「道路橋示方書・同解説」

2) 変遷過程での主な規準の特徴

① S31年 鋼道路橋製作示方書

道示をさかのぼっていくと S31 年の鋼道路橋設計示方書に $\sqrt{2t}$ の記述が出てくるが、次の点で現在と異なっている。

- a. 材片の厚さの差の制限がある。 ($t_2 < t_1^2 / 2$) t_1 : 薄い方、 t_2 : 厚い方
- b. あまり小さなサイズは板厚との釣り合い上好ましくないとの記述あり。

② 昭和 14 年 鋼道路橋設計示方書案

当時の状況を考えると橋梁製作における鋼材片の接合は、鋸接合が一般的で、溶接接合はほとんど実施されていない。よって溶接接合は特殊なケースとして扱われており、以下の記述につながっている。

鋼材ノ溶接ハ図面ニ指示アル場合ノ外使用スヘカラス 但シ監督員ノ許可ヲ得タル場合ハコノ限りニ在ラス

また鋸接合を前提とした状況下での SS400 相当鋼材の化学成分、許容応力度の規定は現在と比べて次表のような違いがみられた。

(SS400)		化 学 成 分 (%)			引張許容 応力度 (kg/cm ²)
		燐	硫黄	その他	
S31年	平炉又は 電気炉に よる場合	0.06 以下	0.06 以下	-	1300
	転炉によ る場合	0.08 以下	0.06 以下	-	1300
H8年		0.05 以下	0.05 以下	-	1400

③ 大正 15 年 道路構造に関する細則案

溶接に関する記述は見られなかった。

3) $\sqrt{2t}$ の決定根拠

現在、我々の調査では $\sqrt{2t}$ の決定根拠の明快な記述に巡り合うことができていない。しかし諸解説から判断して、急冷割れを念頭にした規準であることが推測できる。

2-3 溶接の急冷割れについて

1) 急冷割れを起こす原因

急冷割れの発生は多くの文献に指摘されているように、次の3つの条件が揃った時に生じる。

- ①拡散性水素の存在
- ②じん性低下（溶接部急冷による結晶粒粗大化で鋼材組成と溶接熱履歴に依存）
- ③引張応力の存在（材片の拘束、残留応力、応力集中などによる）

2) すみ肉溶接と急冷割れ

すみ肉溶接に発生する割れは、一般的に急冷割れと見なせ、止端割れ、ビード下割れ、ヒールクラックに分類できる。

上記の急冷割れ原因とすみ肉溶接との関係を $\sqrt{2t}$ に対する我々のテーマから考えると、割れ発生3条件の内、じん性低下と引張応力発生の原因となる溶接部急冷と特に材片拘束度に着目する必要がある。

3) 溶接割れ感受性の評価法

①溶接割れ感受性指示数

S43年に伊藤、別所の提言として、従来の炭素当量算定式をベースに冷却速度と拘束度の影響を加味した溶接割れ感受性指示数が示された。約200鋼種のy開先拘束割れ試験結果に当てはめて導かれている。

溶接割れ感受性指示数は当時の炭素当量化学成分式に、新しい合金元素成分を加え、水素量と板厚（拘束度）の影響を換算して加えたものである。

<溶接割れ感受性指示数>

$$P_c = P_{cm} + \frac{t}{600} + \frac{H}{60} \quad (t: \text{板厚}, H: \text{溶接金属の拡散性水素量})$$

$$\text{但し、} P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

②溶接割れ感受性指数

伊藤、別所はS44年により実構造適用に勝る溶接割れ感受性指標として、溶接割れ感受性指数 P_w を提唱した。これは実際の構造物に想定される種々の拘束度を、小型試験片に再現して求めたものである。

スリット入り y 開先拘束割れ試験片を使って、冷却過程の差異が顕著な 300℃～100℃の冷却時間に着目し、前述の Pc 式の拘束度項を修正した。

<溶接割れ感受性指数>

$$P_w = P_{cm} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40,000}$$

(K：溶接継手の拘束度)

③予熱温度の算定式

拡散性水素の逸散、冷却速度の低減には溶接部近傍の予熱が最も効果的である。伊藤、別所は 3 段階の予熱温度で 100 鋼種ずつ計 300 鋼種の拘束割れ試験を行い、溶接割れ感受性指数 P_w を使って次式を導いた。

$$T^{\circ}\text{C} = 1,440P_w - 392 \quad (T: \text{予熱温度})$$

④道示への適用

予熱規定としてそれまでの炭素当量に代わり、上記の溶接割れ感受性指数は平成 8 年の道示改定に盛り込まれた。

⑤すみ肉溶接との関連

溶接割れ感受性指数 P_w は実構造を念頭にした改良式とはいえ、その構造は突合せ継手を想定しており、一般に拘束度が少ないとされるすみ肉継手に適用されるには厳しい場合がある。

H8 年版道示では、 P_w 採用に際し橋梁溶接継手の平均的な拘束度として板厚 t の 20 倍を想定し、 $K=20 t$ (kgf/mm \cdot mm) とした。

一方伊藤、別所の研究では溶接割れ感受性指数 P_w による割れ感受性の評価は

板厚 $t=19\sim 50$ mm

拘束度 $K=500\sim 3,300$ kgf/mm \cdot mm

の範囲で推定できるものとされており、同様に拘束度の少ない溶接継手にとっては厳しい場合が考えられる。

2-4 すみ肉継手の拘束度

1) 拘束度の定義

拘束度 K (kgf/mm \cdot mm) は佐藤、松井によると「溶接継手の開先間隔を弾性的に平均 1 mm 短縮せしめるに要する単位溶接長あたりの力の大きさ」と定義される。

2) 拘束度の規定

①北海道設計及び施工指針

S56年に北海道土木技術会より出された「北海道における耐候性鋼材裸使用道路橋の設計及び施工指針」に、すみ肉溶接の拘束度測定方法と、橋梁一般構造の典型的な実測拘束度が紹介されている。

これらはS50年の北海道開発局並びに三菱重工横浜造船所の研究報告に基づいている。しかし拘束度に関する実用にマッチした体系化された規定は、今のところ道示を含めて見当たらない状況にある。

②Welding Note

新日鉄の糟谷、百合岡らによるWelding Noteでは板厚と拘束度の関係を拘束度係数別に図式化しているが、それによると板厚が50mmまでは板厚の増加に比例して拘束度が増加しているが、50mmを超えるくらいから変化率が少なくなり、板厚増加の影響がなくなってくる。但しこの研究も突合せ継手を対象としており、一般のすみ肉溶接では板厚と拘束度の関係が、さらに緩やかになるものと推測することもできる。

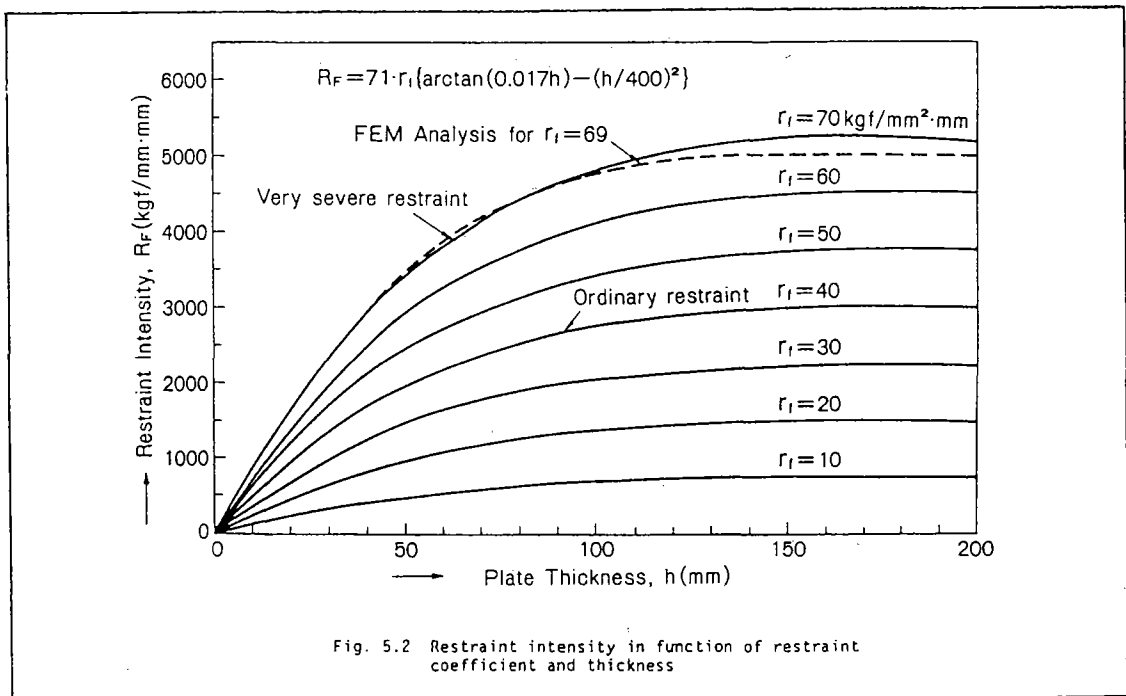


Fig. 5.2 Restraint intensity in function of restraint coefficient and thickness

2-5 急冷割れと入熱量

前述のとおり急冷割れは溶接入熱におけるじん性低下が一因であるため、鋼材組成と溶接熱履歴に依存する。つまり入熱量に深く関係してくると云える。

伊藤、別所の研究は予熱温度推定実験での溶接入熱量を 17,000J/cm としており、

$$\text{予熱温度推定式} \langle T^{\circ}\text{C} = 1,440P_w - 392 \rangle$$

は入熱量を変数とした式ではない。

一方糟谷、百合岡らは「鋼の溶接熱影響部硬さの予測と必要予熱温度の選定方法」(95年新日鉄技報)において、下記のCEN(合金元素項を炭素の関数で表した炭素当量式)を用いて予熱温度推定グラフを導いた。

$$CEN = C + A(C) \left\{ \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5B \right\}$$

$$\text{ここで } A(C) = 0.75 + 0.25 \tanh\{20(C - 0.12)\}$$

これはWelding Noteをベースとして、その後yスリット、T継手等の種々の溶接割れ実験を行い、実構造物の拘束度を考慮して実験結果から得たデータに補正を加えたものである。

下図の図4が板厚に応じたCEN別の必要予熱温度を示し、図5と図6は入熱量と水素量の影響により、CENを補正するものである。

図7は図4から求められるy割れ試験データによる予熱温度を、実施工を対象とした場合の予熱温度に低減する表であり、補修溶接より実施工溶接時の方が予熱温度を低減できることがわかる。これらは基本的に突合せ溶接を中心とした研究であるが、拘束度の一般的に低いすみ肉溶接に対してはさらに施工条件の緩和も考えられるものと思われる。

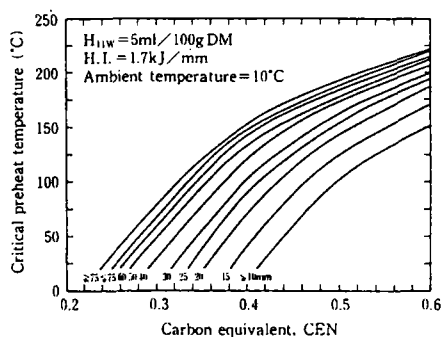


図4 予熱温度推定方法におけるマスターカーブ

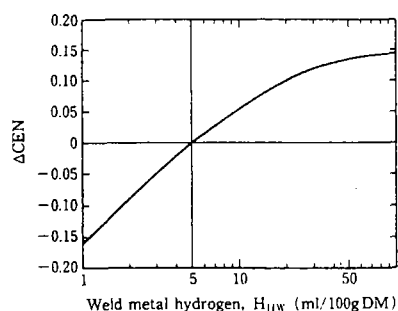


図6 溶接金属水素量とΔCENの関係

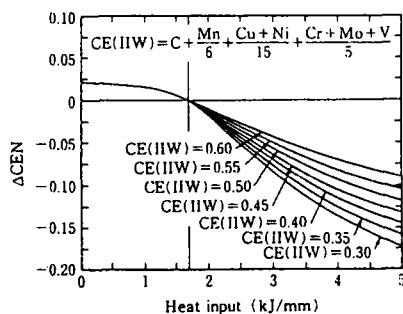


図5 入熱量とΔCENの関係

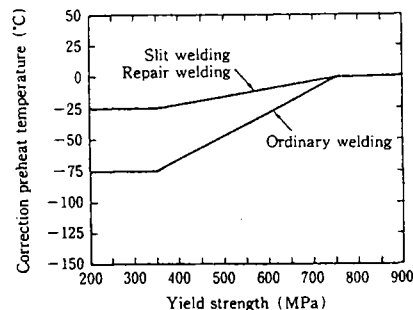


図7 y形溶接割れ試験における予熱温度と実施工時予熱温度の関係