

「疲労強度に及ぼす板厚 効果に関する研究開発」

共同研究報告

2013年9月

社団法人 日本造船工業会

研究目的

- **研究背景**

- 板厚が厚くなるに従い疲労強度が低下することは、板厚効果として知られている。一方、板厚効果に及ぼす継手形式・荷重モードの影響、板厚効果が発生する原因の特定と理論的な推定法については、十分な知見が得られていない。
- こうした中、共通構造規則で一律1/4乗則が義務付けられるなど、板厚効果を必要以上に安全側で評価する傾向が見受けられる。

- **研究目的**

- 疲労強度に及ぼす板厚効果の発生要因を、実験や解析を通じて明らかにし、実船体構造における疲労強度への板厚効果の合理的な手法を確立する。
- 上記知見の、関連する規則等への適切なフィードバックを図る。

研究実施体制

- 主査

横浜国立大学 角 洋一 教授

- 日本造船工業会

IHI,大島造船所,川崎重工業,佐世保重工業,サノヤス・ヒシノ明昌, JMU(IHI-MU, ユニバーサル造船), 住友重機械マリンエンジニアリング, 名村造船所, 三井造船, 三菱重工業

- 鉄鋼会社

神戸製鋼所, JFEスチール, 新日鐵住金(新日本製鐵所, 住友金属工業)

- 学識経験者 等

森 教授 (法政大学), 大沢教授 (大阪大学), 後藤 准教授 (九州大学), 海上技術安全研究所

- 日本海事協会



研究実施内容

疲労強度に及ぼす板厚効果の発生要因の調査、板厚効果の合理的な手法の検討のため、以下の実験・解析を実施した。

1. 基礎試験

板厚の変化に伴う溶接止端部近傍の応力集中及び応力傾斜が疲労強度へ及ぼす影響を調査・確認するために実施

2. 基本溶接継手試験

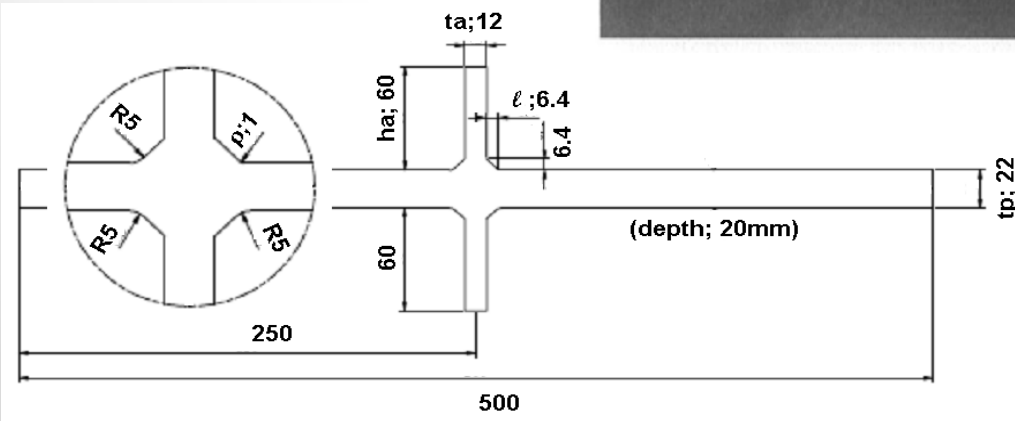
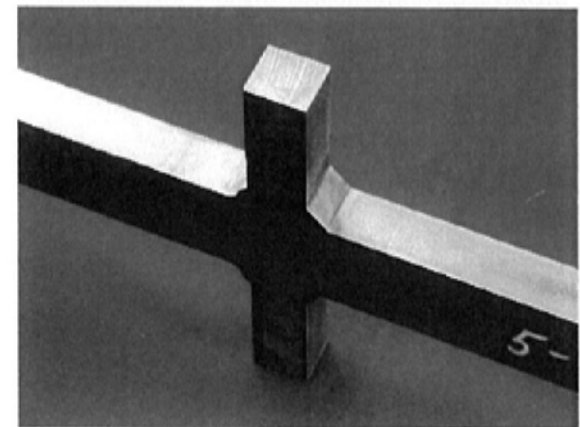
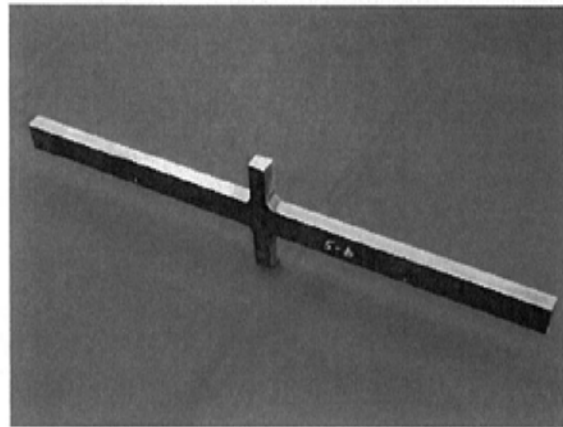
最も一般的な、十字隅肉継手とガセット継手における板厚影響を調査し、基礎試験で得られる知見を確認するために実施

3. 構造物試験

通常の疲労試験片では分からない、実構造に近い荷重伝達形式の下での板厚影響を調査し、基礎試験及び基本溶接継手試験で得られる知見を確認するために実施

基礎試験

- ▶ 板厚により異なる溶接止端部の応力集中係数と板厚方向の応力勾配が疲労強度に及ぼす影響について理解するために実施
- ▶ 形状要因のみを考慮し他の要因を排除するため、鋼板から角肉溶接部の断面を模擬した試験片を切り抜いて試験片を作製（KA32通常鋼）



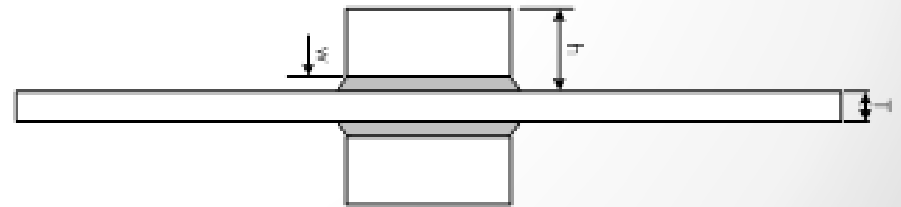
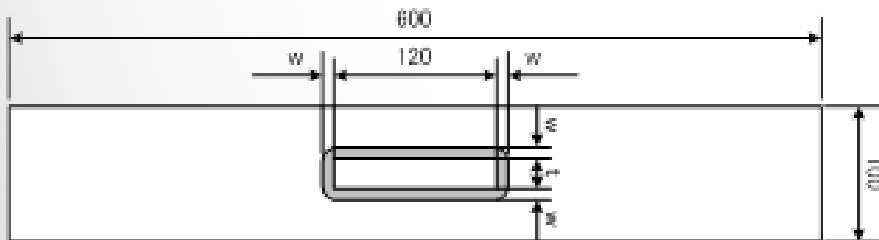
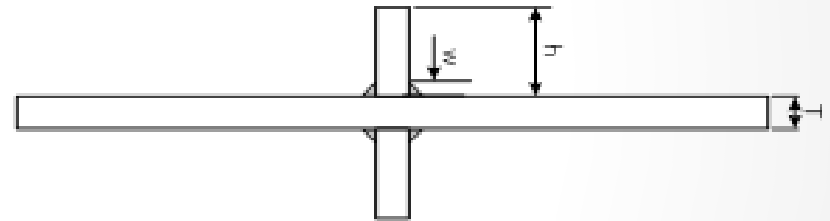
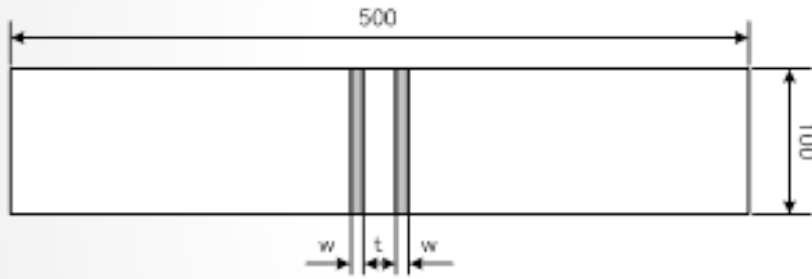
基礎試験の内容

Item to be changed		TP No.	main plate thickness	attached plate thickness	attached plate height	weld leg length	toe radius
A	main plate thickness	1	12	12	60	6.4	1
		2	22				
		3	40				
		4	80				
B	attached plate thickness	3	40	12	60	6.4	1
		5		22	60	8.4	
		6		40	80	12	
		7		80	160	20	
C	both plate thicknesses	1	12	12	60	6.4	1
		8	22	22	60	8.4	
		6	40	40	80	12	
		9	80	80	160	20	
D	toe radius	10	22	12	60	6.4	0.5
		2					1
		11					3
		12	40	22	60	8.4	0.5
		5					1
		13					3

溶接脚長 = $0.2 \times$ 付加物板厚 + 4 mm

基本溶接継手試験

- 基本的な溶接継手における板厚影響を確認するために実施（KA32 TMCP鋼）
- 十字隅肉継ぎ手における残留応力の影響を確認するために実施
 - 溶接後処理(PWHT)を下試験片と溶接まま試験片を準備



基本溶接継手試験の内容

joint type	Test No.	main plate thickness	attached plate		Target weld length	Target toe radius
			thickness	height		
cruciform fillet welded joint	2-AW	40	22	60	8.4	1
	2-SR	40	22	60	8.4	1
	3-AW	40	80	160	12	1
	3-SR	40	80	160	12	1
out-of-plane gusset welded joint	5-AW	12	12	60	6.4	1
	6-AW	22	12	60	6.4	1
	7-AW	40	12	60	6.4	1
	8-AW	80	12	60	6.4	1
	9-AW	40	24	60	8.4	1

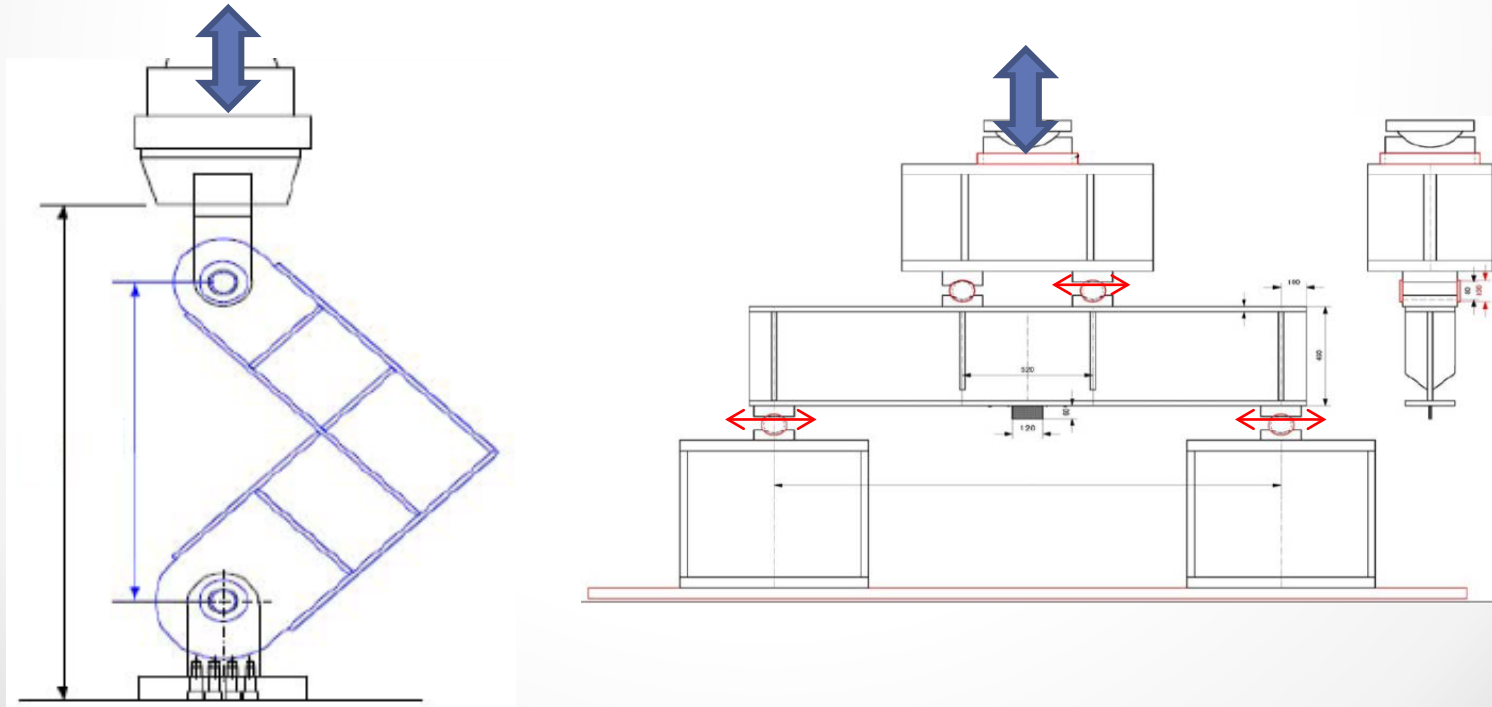
溶接脚長 = $0.2 \times$ 付加物板厚 + 4 mm

AW ; 溶接まま継手

SR ; PWHTにより溶接残留応力除去を施した継手

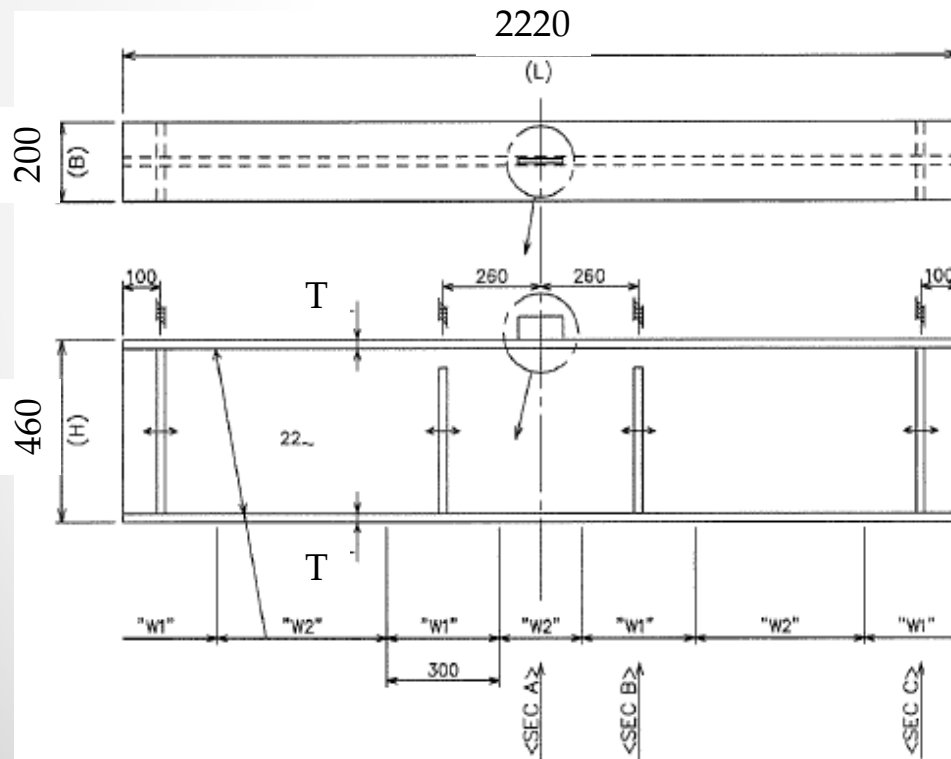
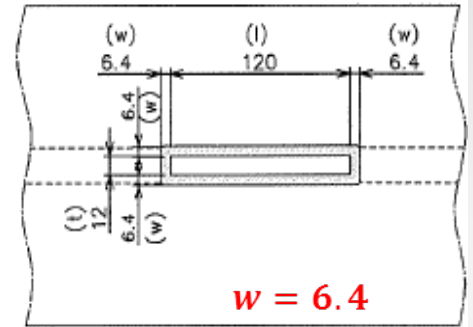
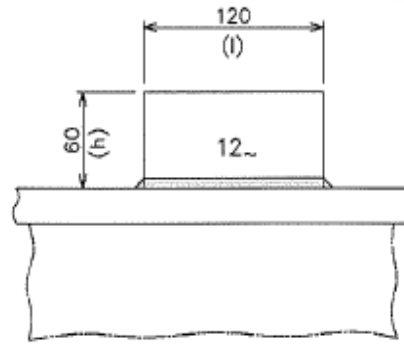
構造物試験

- ▶ 実構造に近い荷重伝達形式の下での、大型溶接構造における板厚影響を確認・調査するために実施（KA32 TMCP鋼）
- ▶ 基礎試験及び基本溶接継手試験における知見を確認するために実施
- ▶ 船体構造で一般的な構造も模擬した構造モデルを準備
 - ▶ I型断面梁上の面外ガセット溶接継手（I型モデル）
 - ▶ L型構造の隅肉溶接継手（L型モデル）

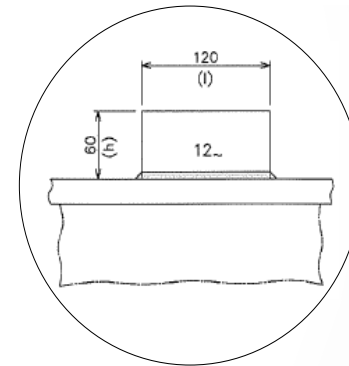


構造物試験 (I-type)

	I-22	I-40	I-80
T	22	40	80

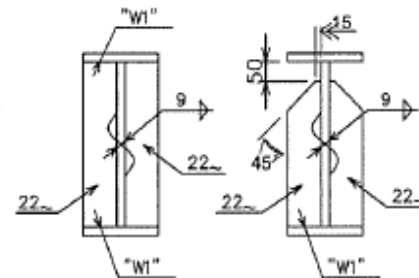


<SEC A>

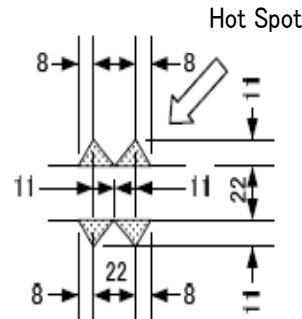
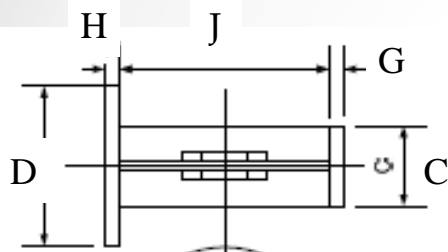


<SEC B>

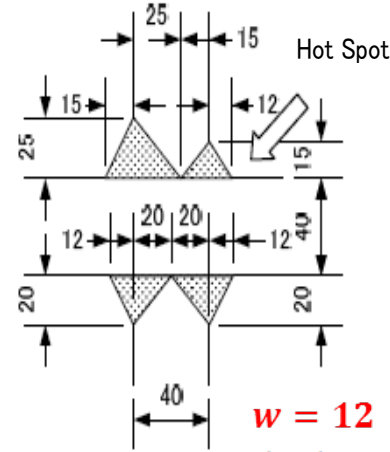
<SEC C>



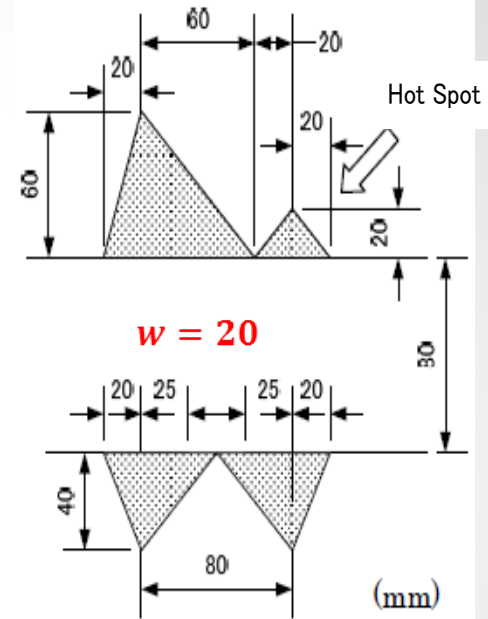
構造物試験 (L-type)



$w = 8$

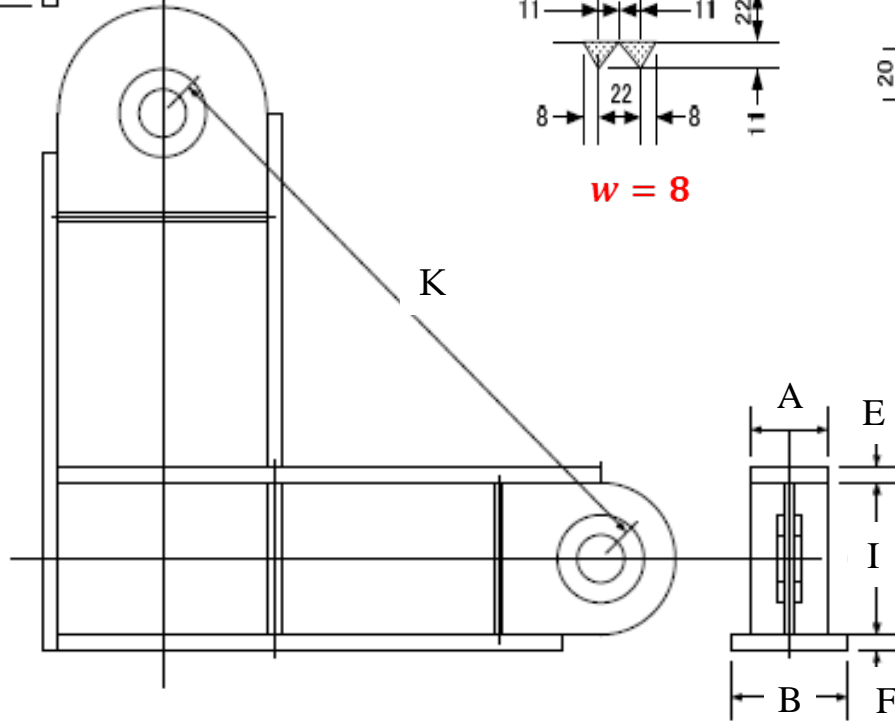


$w = 12$



$w = 20$

(mm)

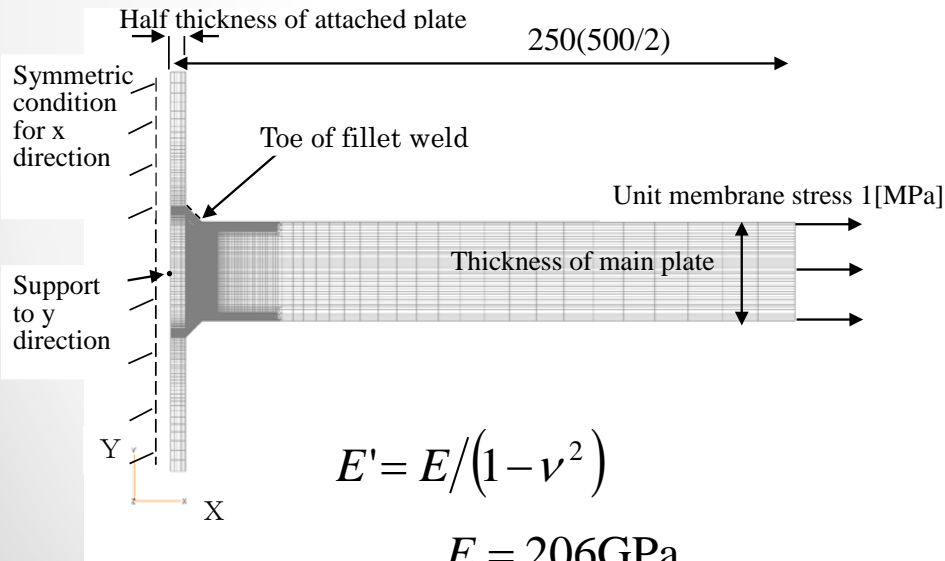


nominal dimensions (mm)			
	model		
	L-22	L-40	L-80
A, C	200		
B	300		
D	400		
E, F, G, H	22	40	80
I	415	380	300
J	566	530	450
K	1549	1577	1487

FE解析モデル

基礎試験

- 1/2モデル
- 対称境界条件
- 平面歪要素
- 最小メッシュサイズ 0.05 mm
- 一様荷重



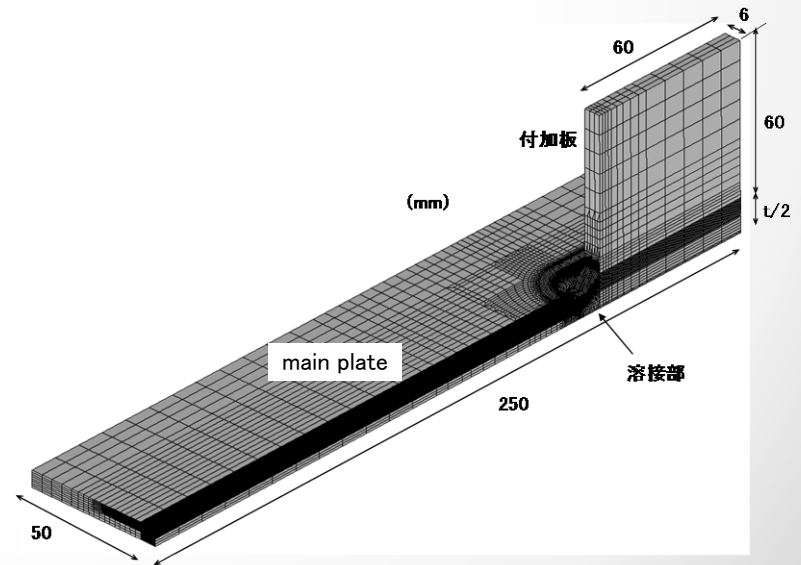
$$E' = E / (1 - \nu^2)$$

$$E = 206 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.3$$

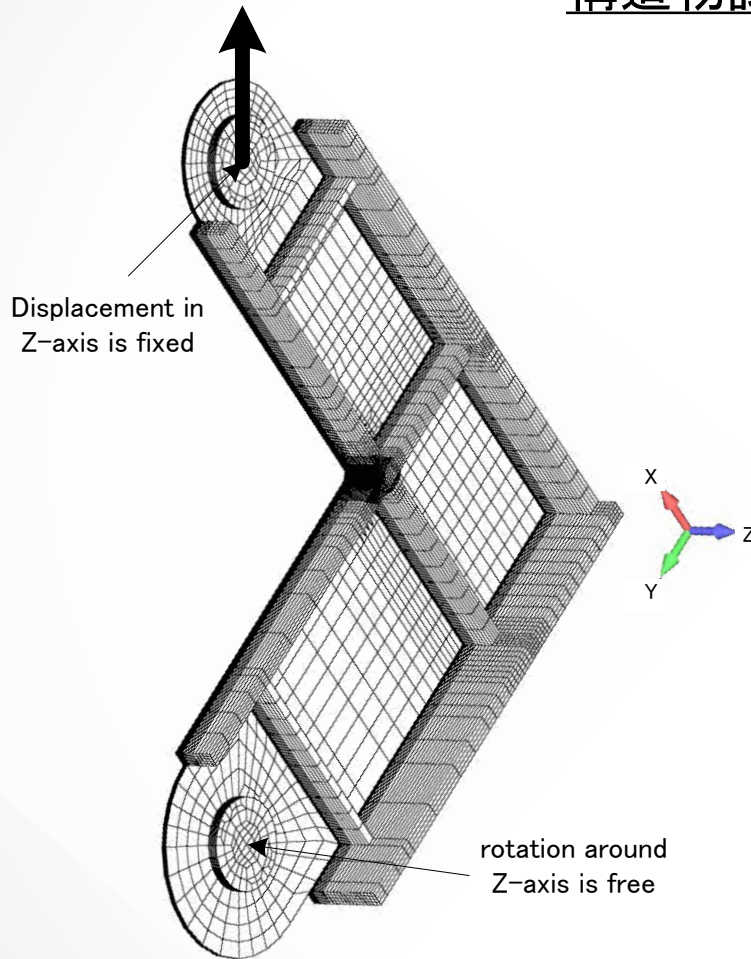
基本溶接継手試験

- 1/8モデル
- 対称境界条件
- Solid要素
- 溶接止端R部に沿って10要素
- 一様荷重

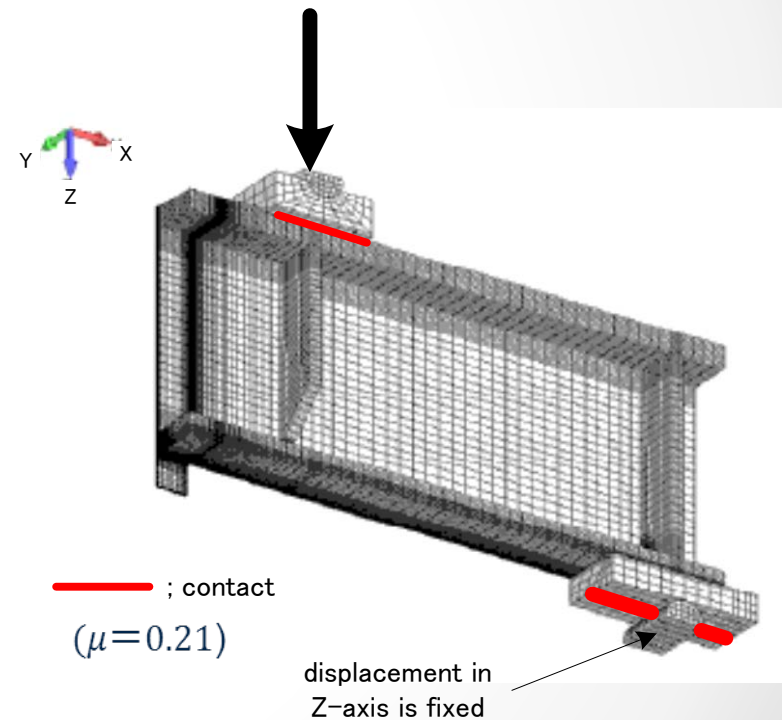


FE解析モデル

構造物試験



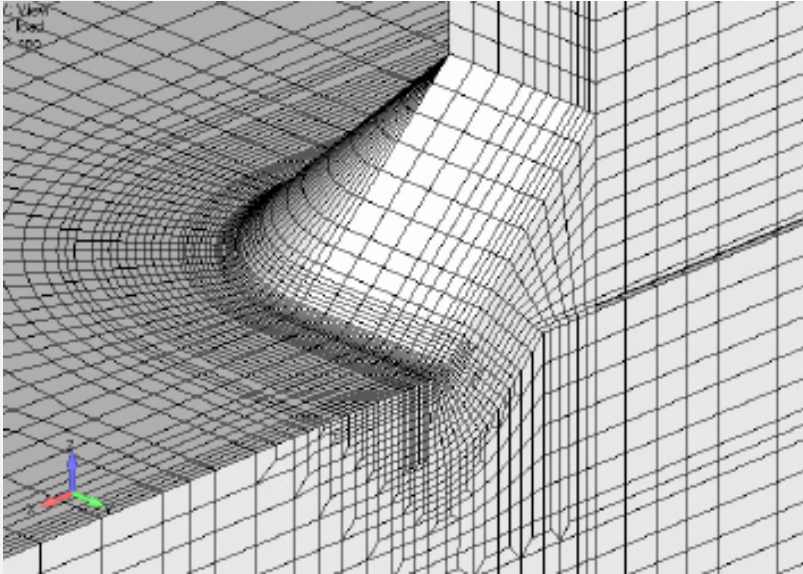
1/2 solid モデル
対称境界条件



1/4 solid モデル
対称境界条件

FE 解析モデル

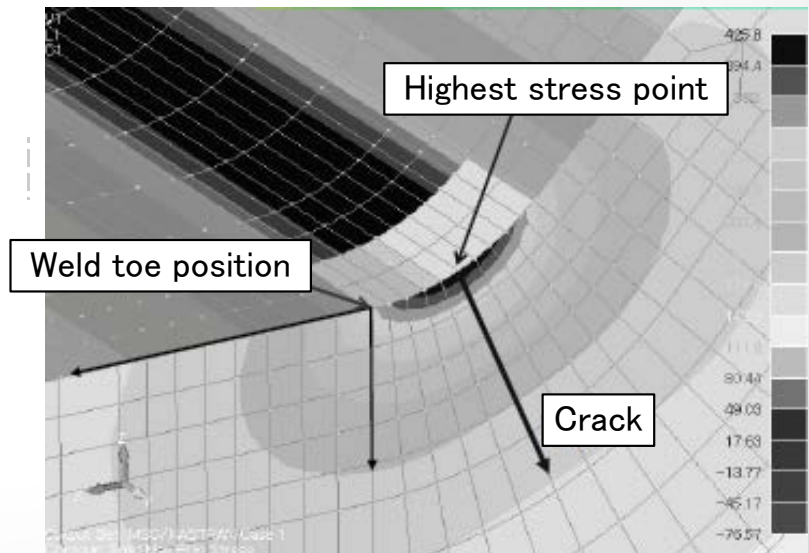
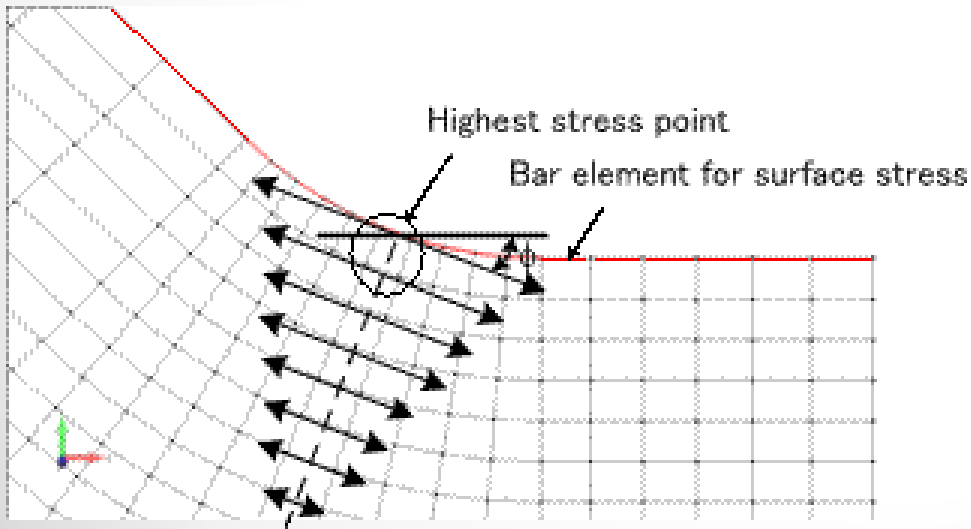
基本溶接継手試験、構造物試験の溶接部



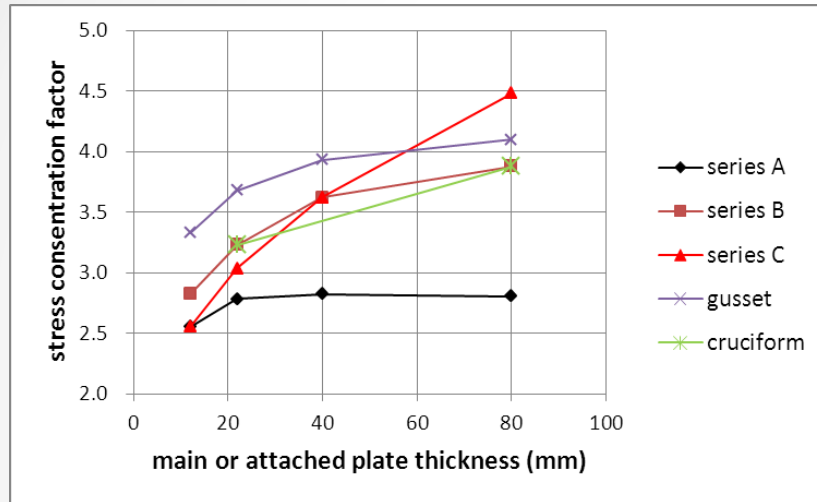
- 溶接部(溶接脚長、止端半径)は試験体の溶接部の実測に基づきモデル化
- I型モデルについては未溶着部を0.4mmのスリットでモデル化
- 溶接止端のR部に沿って10要素を配置
- 溶接止端R部の要素上に厚さ 10^{-3} mmの膜要素を配置

解析評価手順

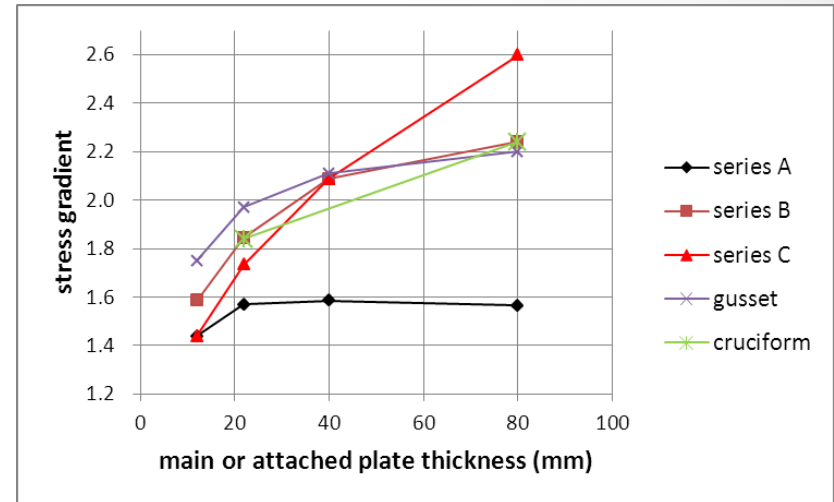
- 溶接止端部の表面応力を評価
- 応力集中係数を評価
- 表面応力が最大となる位置の要素において、主応力の方向(ϕ)を計算
- 溶接止端の法線方向における各要素の ϕ 方向の応力を、深さ1mmまで計算
- 深さ1 mmまでの平均応力勾配を計算



溶接止端部の集中係数と応力勾配



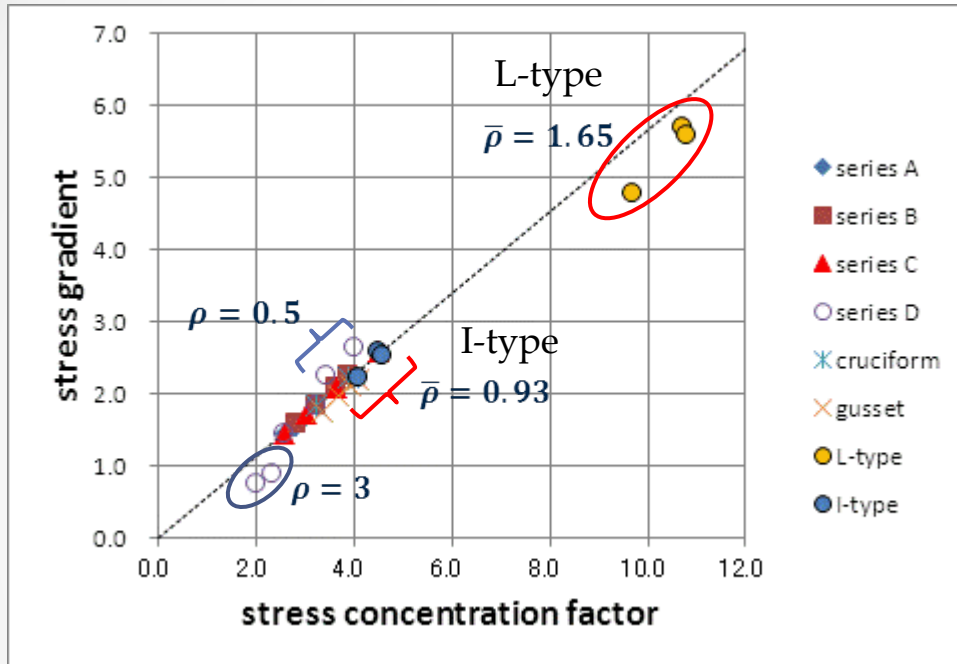
応力集中係数



応力勾配

- 付加物板厚が変化しない場合、応力集中係数及び応力勾配は主板厚の変化に鈍感である
- 付加物板厚が変化する場合、応力集中係数及び応力勾配は板厚の変化に応じて大きくなる
- 主板厚と付加物板厚が共に変化する場合、応力集中係数及び応力勾配は主板厚の変化に敏感である

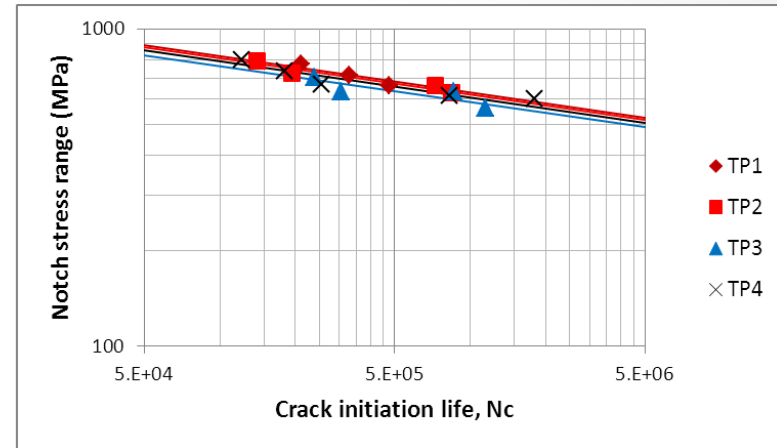
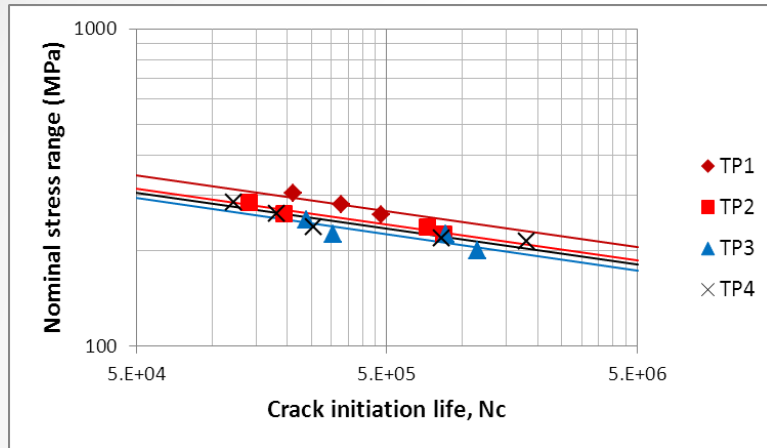
溶接止端部の集中係数と応力勾配



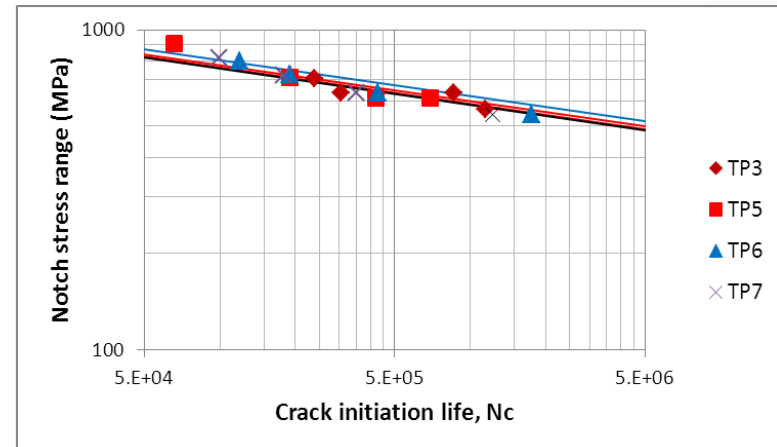
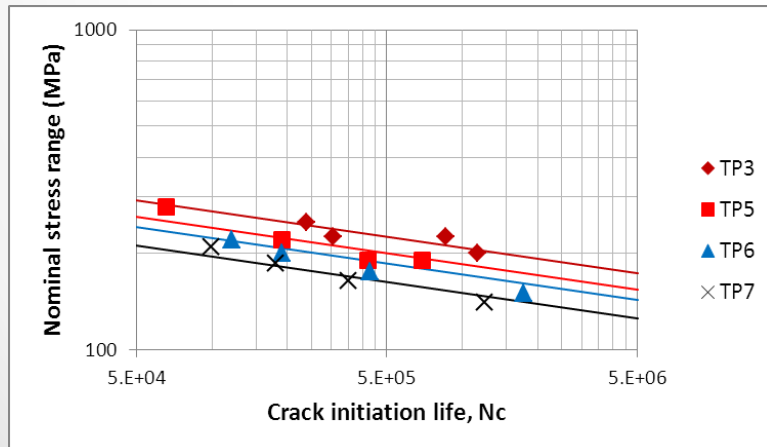
- 応力集中係数と応力勾配は線形関係にある
- 線形関係は止端半径により変化する

Model	ID	plate thickness (mm)	weld length (mm)		toe radius (mm)	stress concentration factor	stress gradient
			main	attached			
L-type	L-22	22.5	13.35	17.18	1.81	9.68	4.79
	L-40	40.5	13.32	19.14	1.48	10.70	5.70
	L-80	81.0	13.23	21.49	1.63	10.79	5.59
I-type	I-22	22.5	10.52	6.98	0.98	4.10	2.23
	I-40	40.5	10.31	7.57	0.84	4.51	2.59
	I-80	81.0	9.76	7.40	0.98	4.57	2.54

疲労試験結果（基礎試験）

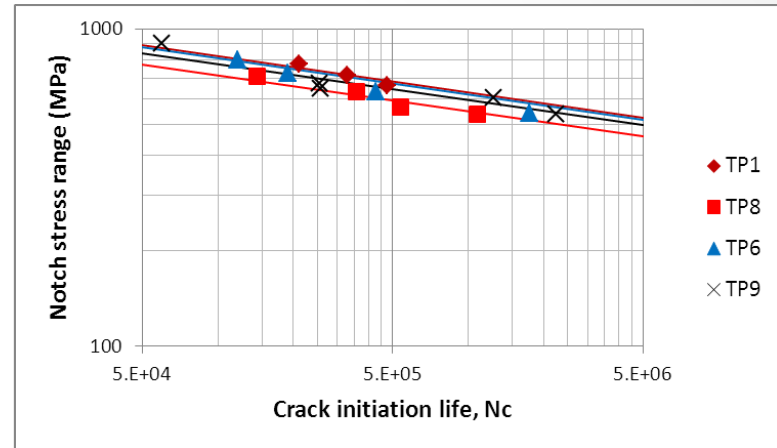
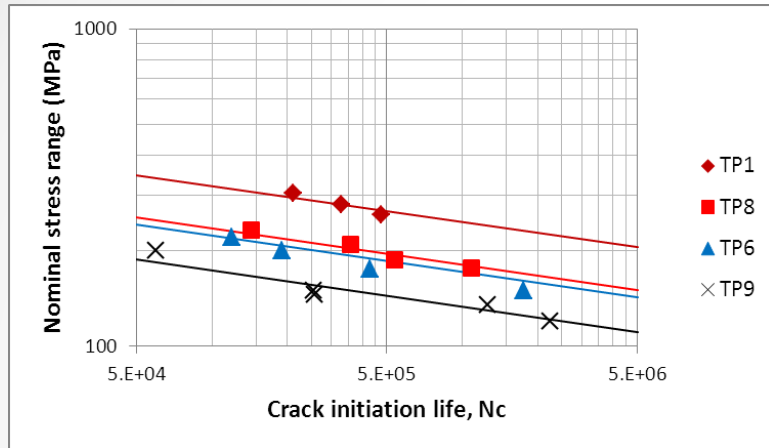


Aシリーズ; 主板厚変化、付加物板厚一定
 $t_a=12$, TP1 ; $t_p=12$, TP2 ; $t_p=22$, TP3 ; $t_p=40$, TP4 ; $t_p=80$

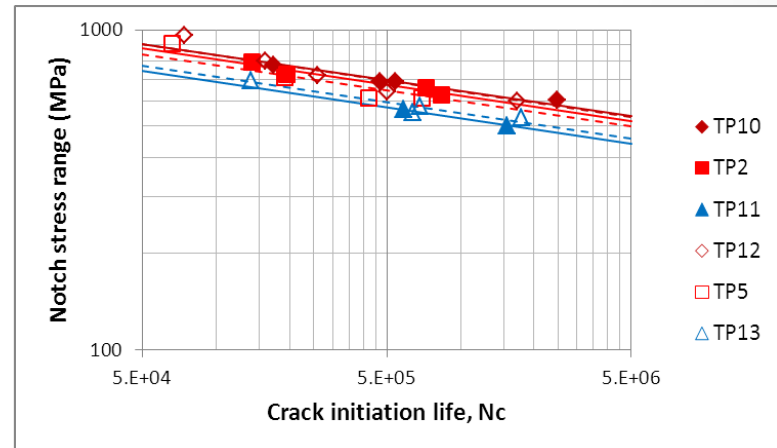
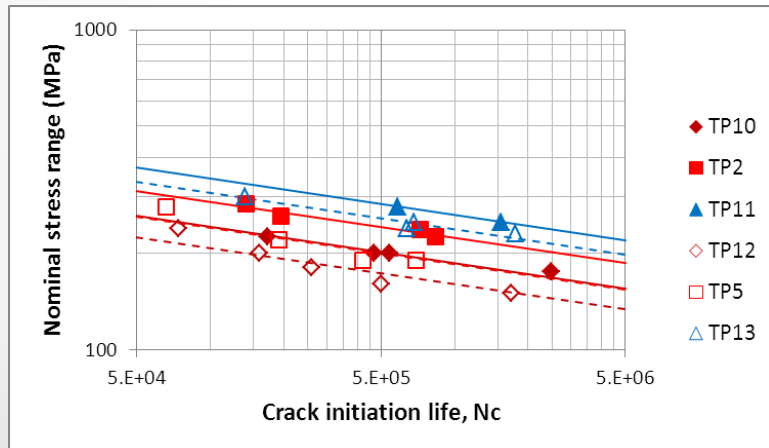


Bシリーズ; 主板厚一定、付加物板厚変化
 $t_p=40$, TP3 ; $t_a=12$, TP5 ; $t_a=22$, TP6 ; $t_a=40$, TP7 ; $t_a=80$

疲労試験結果（基礎試験）



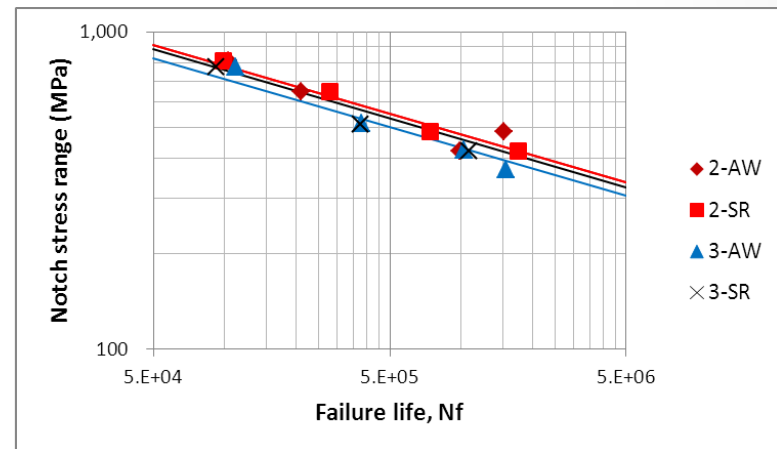
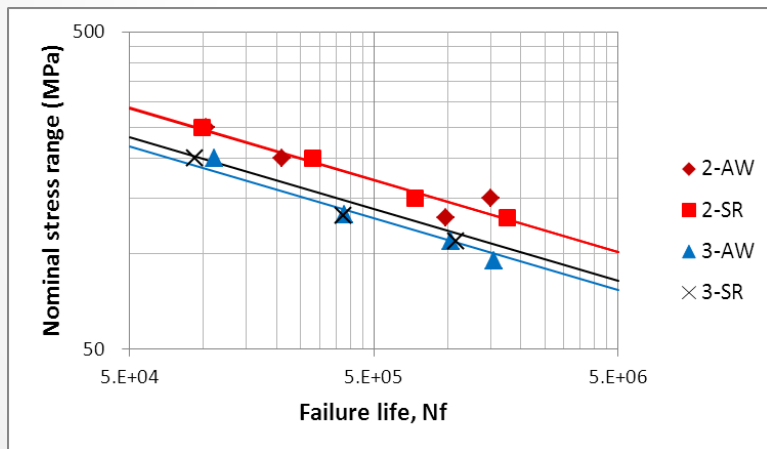
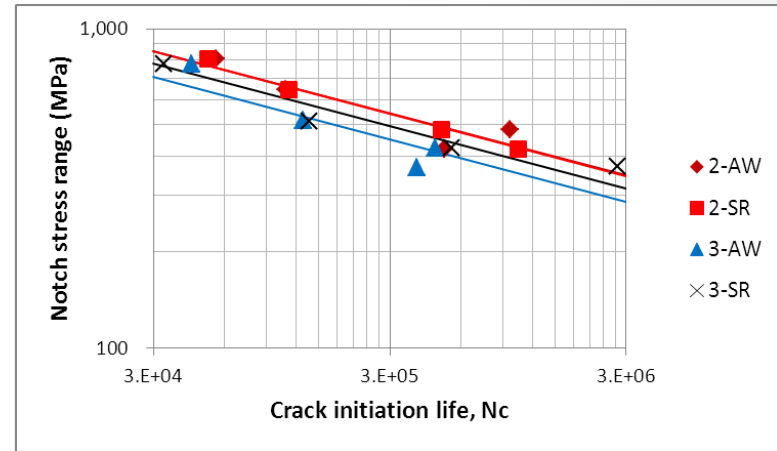
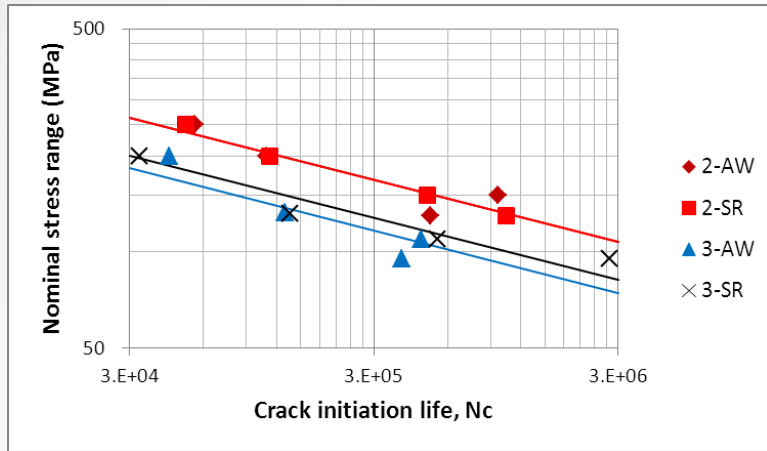
Cシリーズ; 主板厚と付加物板厚が共に変化
 TP1 ; $t_p=t_a=12$, TP8 ; $t_p=t_a=22$, TP6 ; $t_p=t_a=40$, TP9; $t_p=t_a=80$



Dシリーズ; 止端変形変化

$t_p=22, t_a=12$, TP10 ; $\rho=0.5$, TP2 ; $\rho=1$, TP11 ; $\rho=3$ & $t_p=40, t_a=22$, TP12 ; $\rho=0.5$, TP5 ; $\rho=1$, TP13 ; $\rho=3$

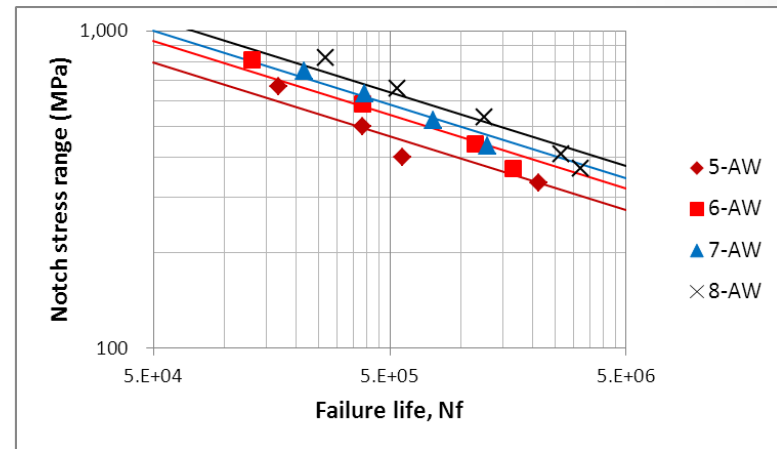
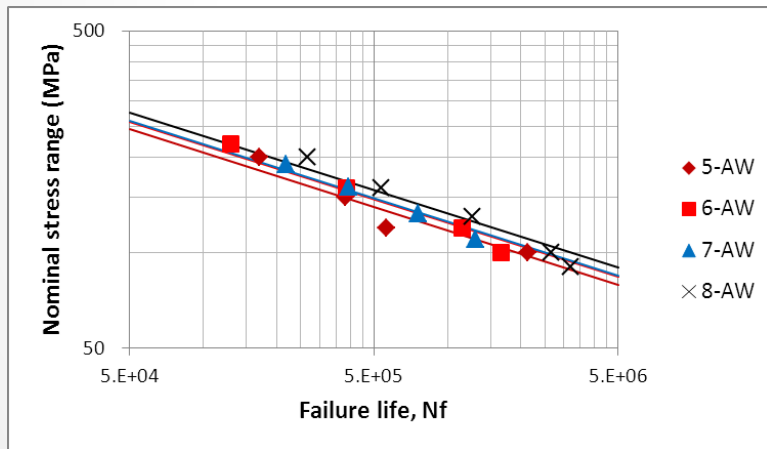
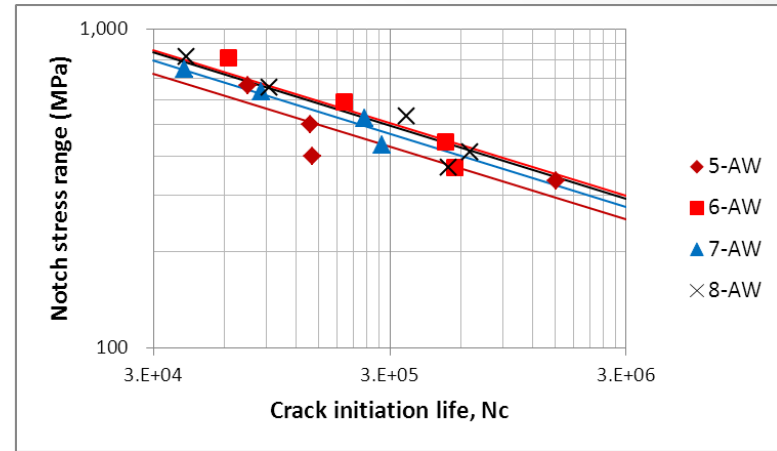
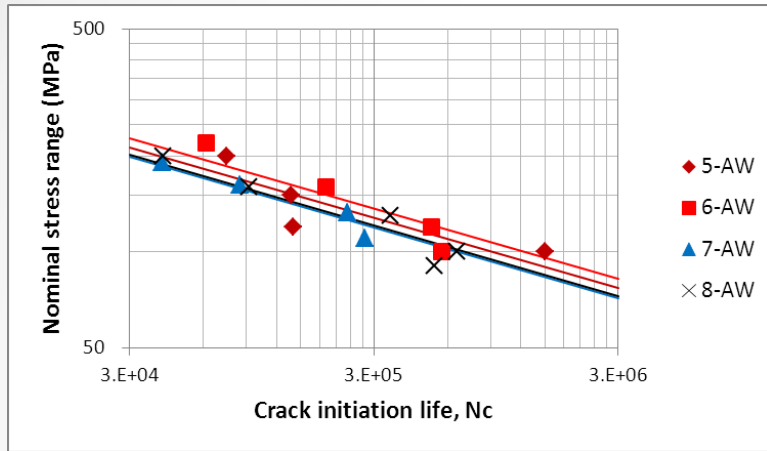
疲労試験結果（基本溶接継手試験）



十字隅肉溶接継手

2-AW, 2-SR ; $t_p=40$, $t_a=22$, 3-AW, 3-SR ; $t_p=40$, $t_a=80$
AW , as-welded, SR ; PWHT

疲労試験結果（基本溶接継手試験）



面外ガセット溶接継手

$t_a=12$, 5-AW ; $t_p=12$, 6-AW ; $t_p=22$, 7-AW ; $t_p=40$, 8-AW ; $t_p=80$,
AW , as-welded

基礎試験・基本溶接継手試験のまとめ

▶ 基礎試験；

- 付加物板厚が一定の場合、主板厚の変化による板厚影響は小さい
- 主板厚が一定の場合でも、付加物板厚の変化により板厚影響が観察される
- 主板厚と付加物板厚が共に変化する場合、板厚変化による板厚影響は顕著である
- ノッチ応力による評価では板厚影響に対する考慮は必要ない

▶ 基本溶接継手試験；

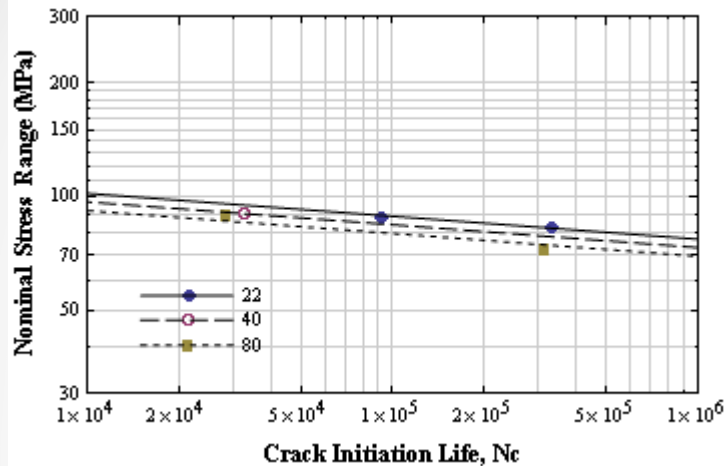
- 十字隅肉溶接継手において、疲労強度への溶接残留応力の影響は無視できるほど小さい
- 面外ガセット溶接継手において、主板厚の変化による板厚影響は非常に小さい

▶ 得られた知見；

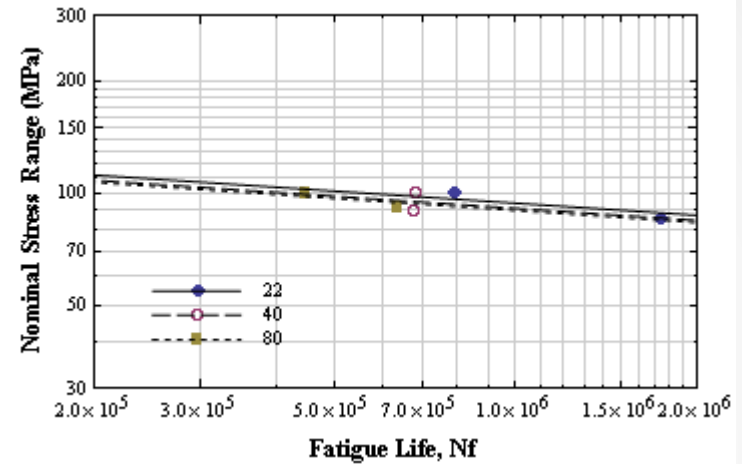
- 板厚影響は主板厚より付加物板厚に敏感である(溶接サイズが付加物板厚により決められる)
- 溶接サイズに依存する止端部の応力集中係数と応力勾配が、板厚影響の支配的要因である

疲労試験結果（構造物試験）

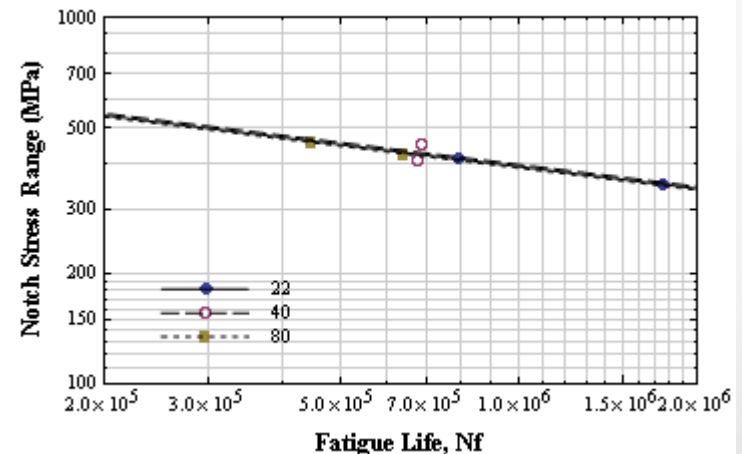
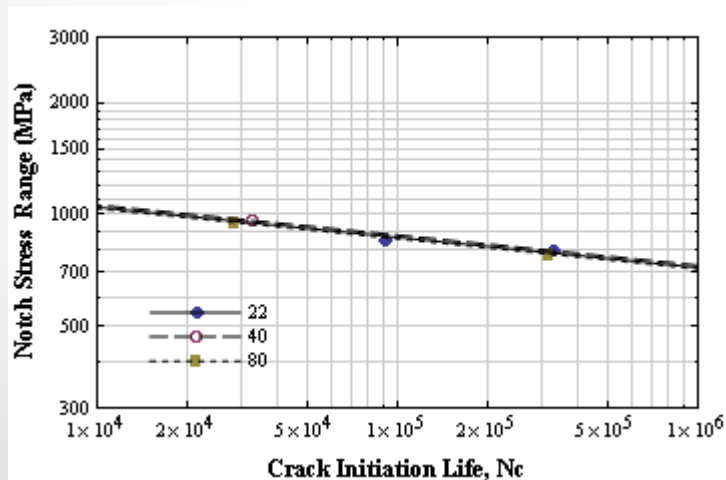
L-type structural model



I-type structural model

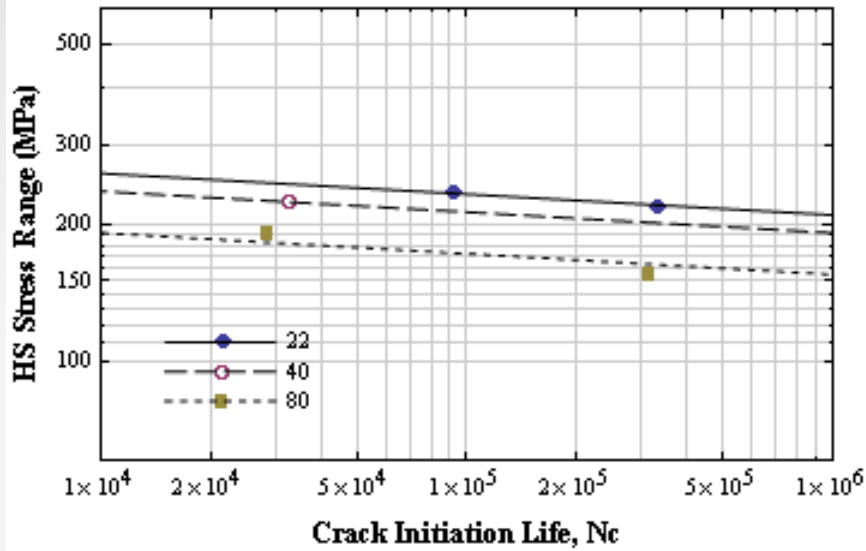


Relation between NOMINAL stress range and fatigue life

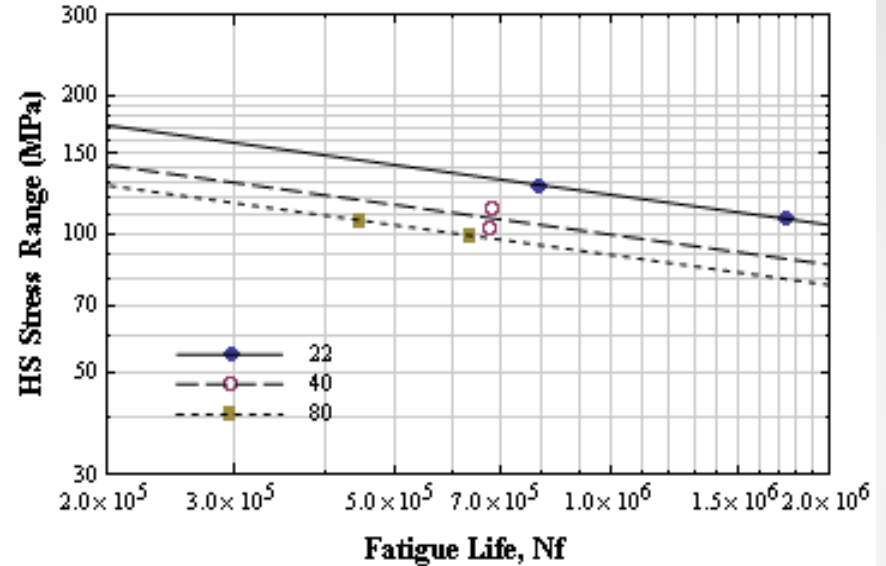


Relation between NOTCH stress range and fatigue life

疲労試験結果（構造物試験）



L-type structural model



I-type structural model

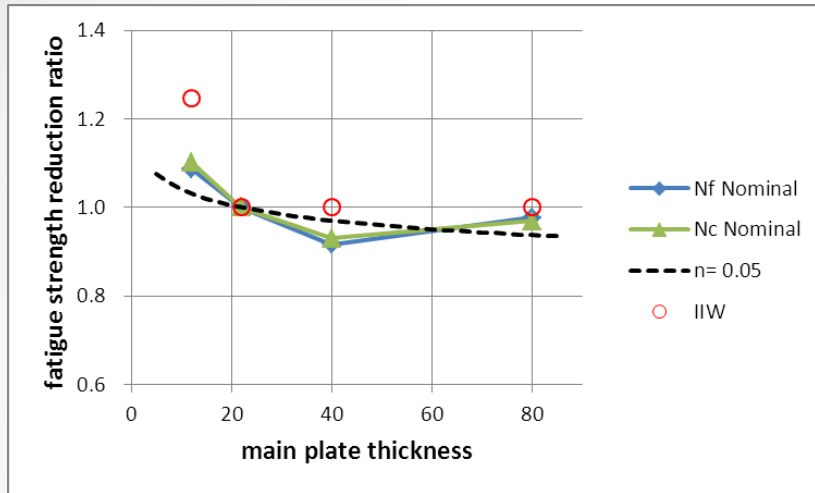
Relation between **HOT SPOT** stress range and fatigue life

応力集中係数の比較

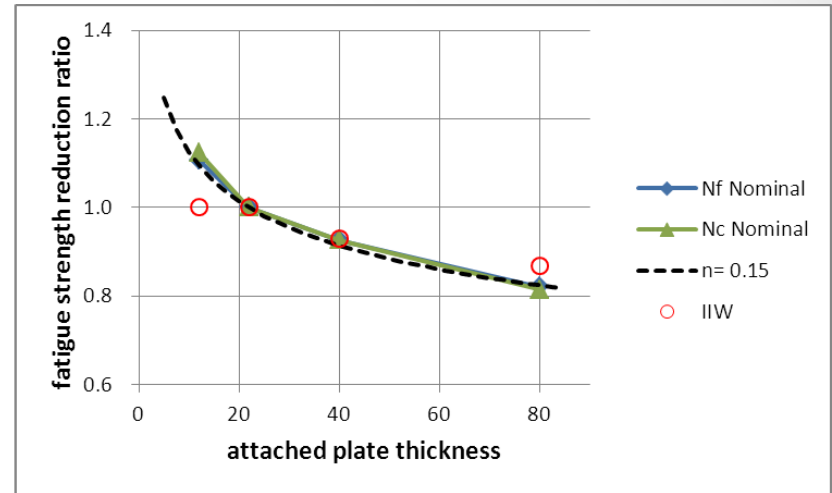
	I-type		L-type	
	HS	notch	HS	notch
22	1.27	4.10	2.03	9.68
40	1.14	4.51	1.91	10.70
80	1.07	4.57	1.84	10.79

ホットスポット応力の定義(0.5t - 1.5t 線形外挿法)に問題があると考えられる

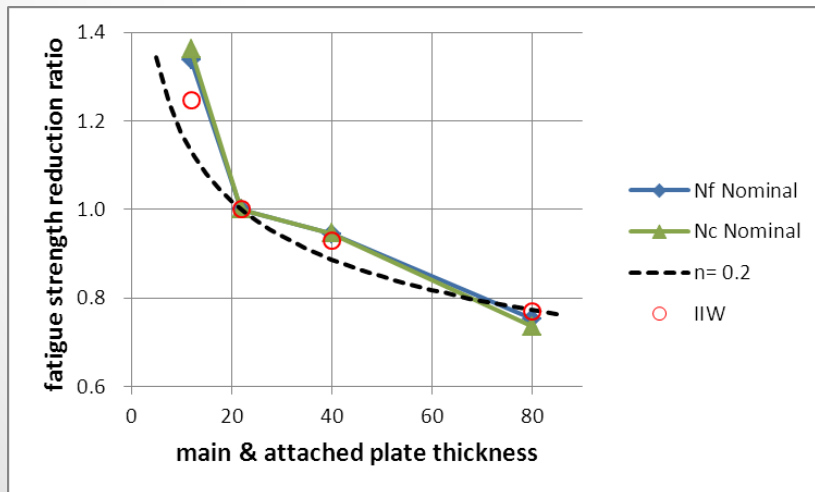
板厚影響の評価



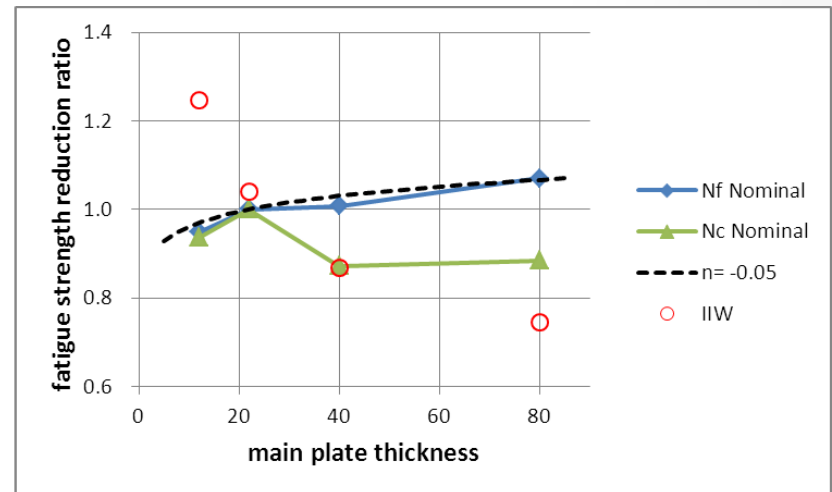
基礎試験, A シリーズ



基礎試験, B シリーズ

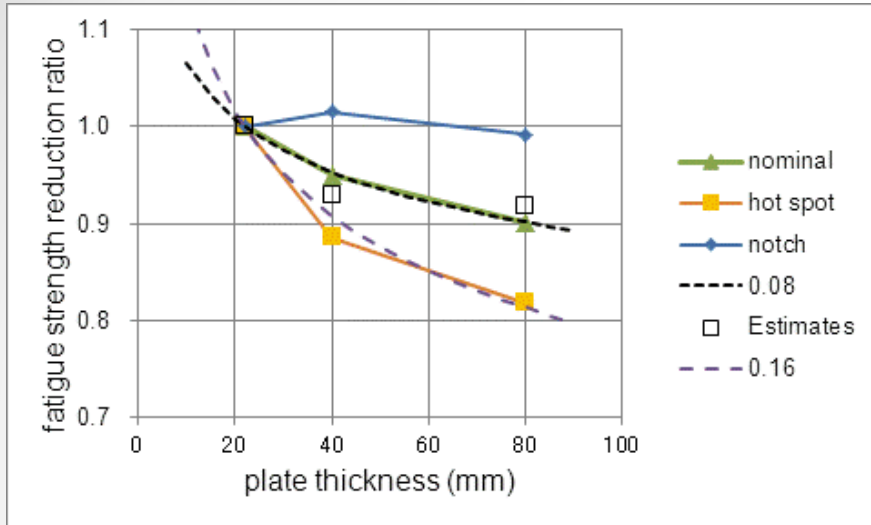


基礎試験, C シリーズ

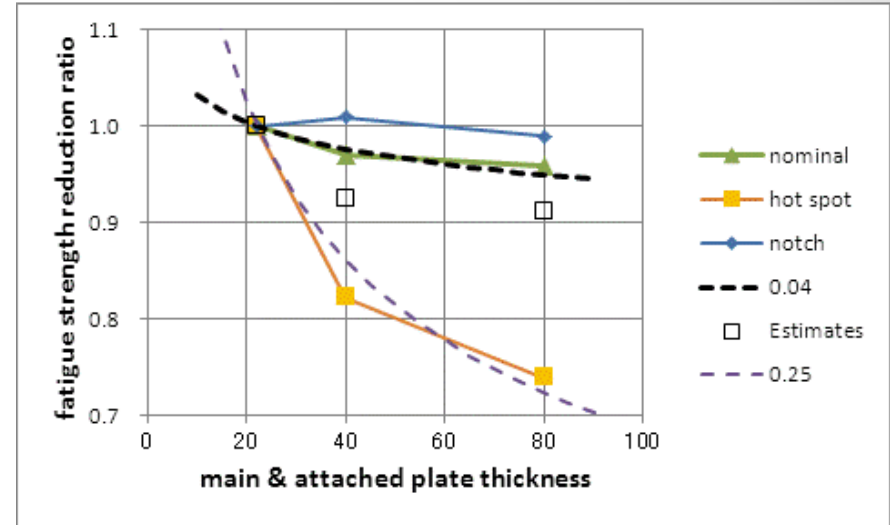


面外ガセット溶接継手

板厚影響の評価



構造模型試験; L-type

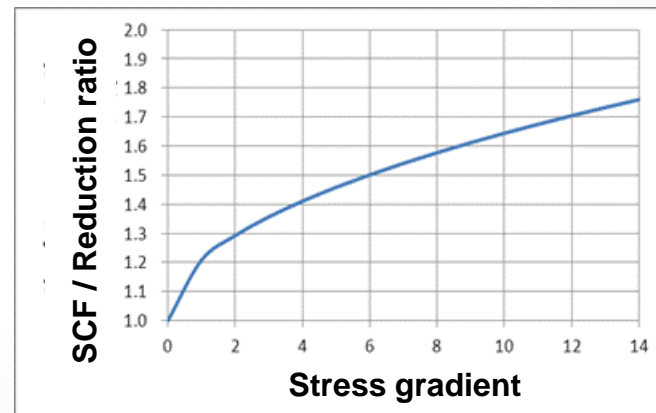


構造模型試験; I-type

板厚影響による疲労強度低減率

Fatigue strength reduction ratio

- Experiments ; $\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta\sigma_{22}}$
- Formula ; $\left(\frac{22}{t}\right)^n$
- Estimates ; Siebel's diagram



まとめ

- ✓ 疲労強度における板厚影響は、主板厚の変化より付加物板厚の変化に敏感である。これは、溶接止端部の応力集中係数及び応力勾配に支配的な溶接部の大きさが、付加物板厚に基づいて決定されるためと考えられる。
- ✓ IIWにおける十字隅肉継ぎ手に対する板厚影響の評価は、主板厚と溶接脚長を含む付加物の大きさに基づき行っており、十分妥当な結果を与えることが分かった。
- ✓ 溶接構造物における板厚影響は、荷重伝達機構の違いから、小型試験片で観察される板厚影響より非常に小さいことが分かった。
- ✓ 溶接残留応力の板厚影響に与える影響は無視できることが分かり、溶接止端部の応力集中及び応力傾斜によりほぼ決まることが分かった。
- ✓ ホットスポット応力による疲労評価における従来のホットスポット応力の定義では、厚板になるほど応力参照点が応力集中部から離れるため応力を過小評価することが分かった。

結果のフィードバック

本検討委員会で得られた知見を、IACSにおけるCSR-H規則案検討の場下記項目としてフィードバックさせることにより、合理的な板厚影響の評価規則化をほぼ達成することができた。

✓ 十字隅肉継ぎ手における付加物寸法の考慮

- 主板厚が付加物の大きさに比べて大きくなった場合に、板厚影響は飽和する。
- 板厚影響による疲労強度減少率に、主板厚及び付加物サイズから決まる下限値を設けた。

✓ 荷重伝達機構に対する考慮

- 主として荷重を分担する部材の直上に付加物が溶接されている場合、板厚影響は殆ど生じない。
- 板厚影響による疲労強度減少率を規定する指数係数を0.1とした。