
疲労強度に及ぼす板厚効果に関する研究開発

2014年5月

ジャパンマリンユナイテッド株式会社

岡田 哲男

疲労強度とは

近年では、船体構造の損傷の多くは疲労による亀裂。

→ 疲労設計の重要性高まる。

<SN曲線>

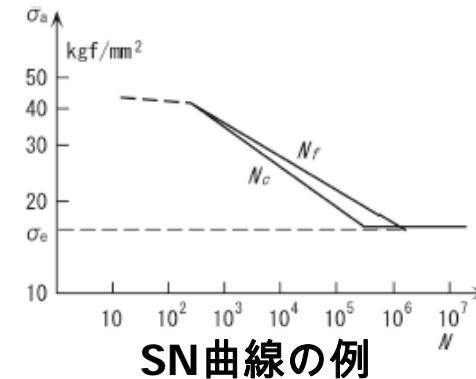
定振幅疲労試験によりプロット。

<船舶の疲労被害度推定>

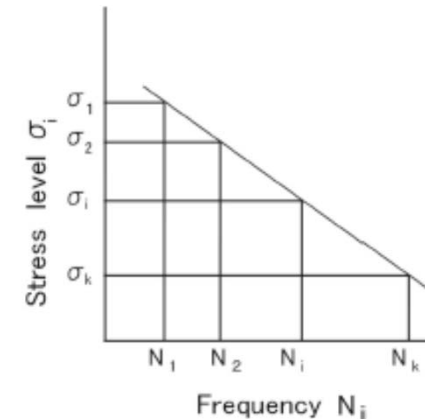
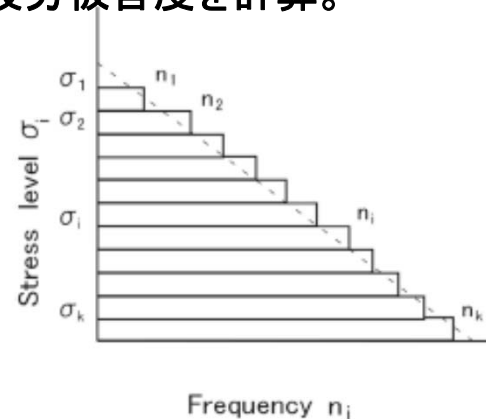
設計寿命の間に受ける応力変動の履歴は確率的なもの。

→ 長期の波浪応力頻度に従い、設計寿命間の応力レベル毎の遭遇頻度を推定。

→ 線形累積被害則(マイナー則)により疲労被害度を計算。



$$C_w = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$



疲労強度に影響を及ぼす因子

- ・平均応力： 圧縮に強く、引張に弱い
- ・残留応力： 溶接残留応力(降伏応力程度の引張)→材料強度依存性の喪失
- ・溶接ビード形状(特に止端部の半径・フランク角)
- ・鋼材強度
- ・継手形式
- ・工作誤差(角変形・目違い)
- ・溶接欠陥
- ・応力履歴(線形累積被害則からの乖離)
- ・板厚： 厚い→疲労強度低下 (板厚比の0.1~0.3乗の補正で考慮)

研究の背景・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、板厚効果の要因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、CSR(共通構造規則)では単純な1/4乗則(下式)が一律義務付けられているが、近年の研究で実際の板厚効果がかなり小さい事例も見受けられるようになった。

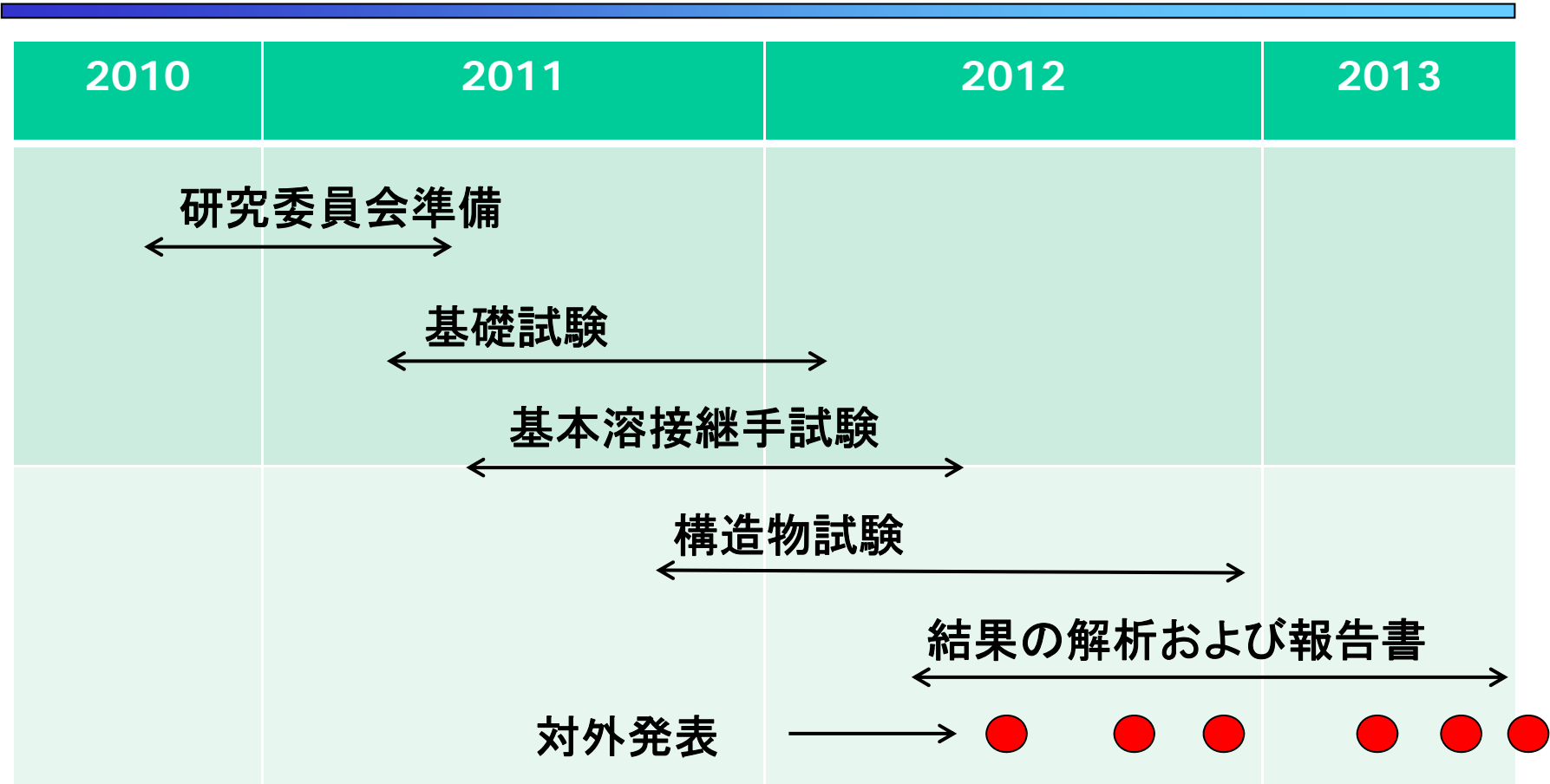
$$\log(N) = \log(K_2) - m \log \left(\frac{S_{Ri}}{(22/t_{net50})^{0.25}} \right)$$

- 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。

研究委員会の組織化と対外発表



ISOPE2012, IIW2012, JASNAOE 2012, IIW2013, TSCF2013,
Welding in the World

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, サノヤス造船, JMU, 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
- 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

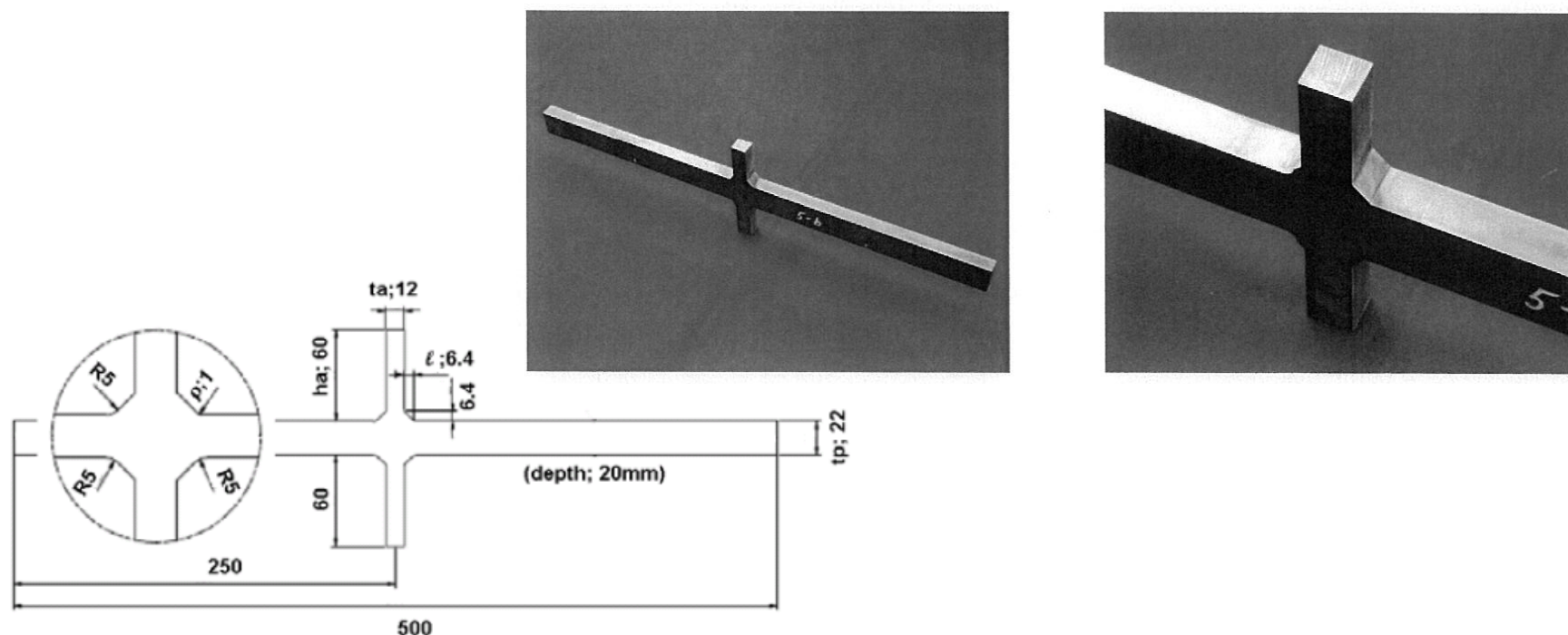
最も一般的な、十字隅肉継手とガセット継手における板厚影響を調査し、基礎試験で得られる知見を確認するために実施

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、鋼板から隅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）



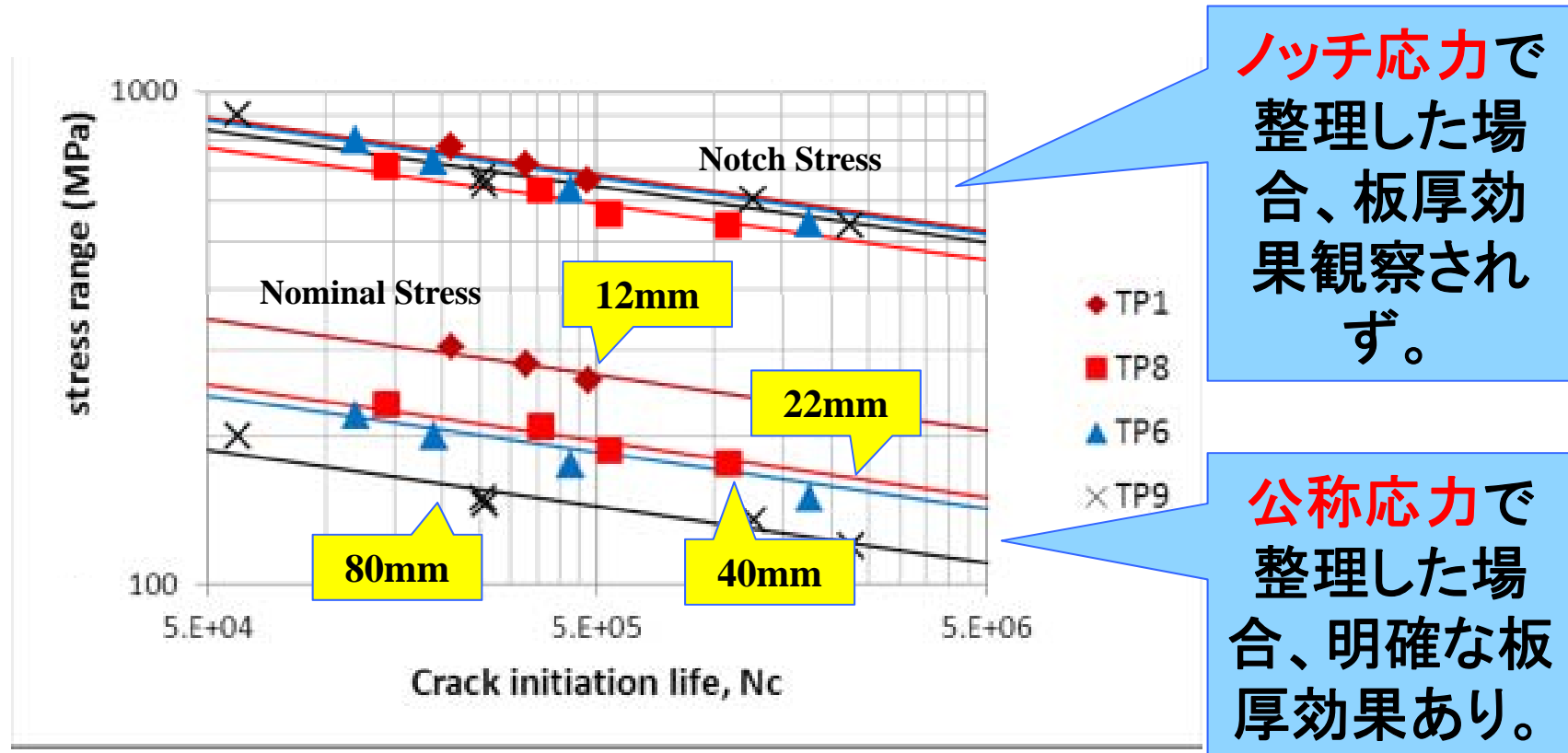
基礎試験の内容

主板厚と付加板物厚などの様々な組み合わせに対して、疲労試験を実施。

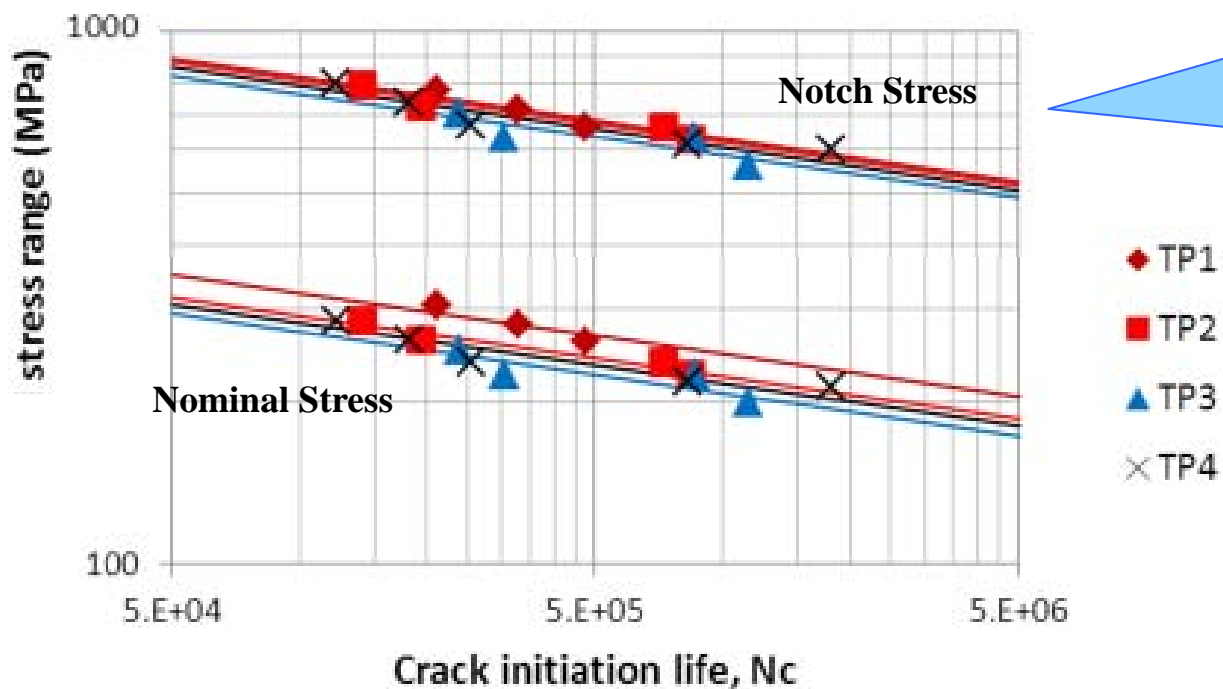
(unit: mm, width of specimen=20mm)

TP No	main plate thickness; tp	attached plate thickness; ta	attached plate height; ha	weld length; ℓ	toe radius; ρ	
A	1	12	12	60	6.4	1
	2	22				
	3	40				
	4	80				
B	3	40	12	60	6.4	1
	5		22	60	8.4	
	6		40	80	12	
	7		80	160	20	
C	1	12	12	60	6.4	1
	8	22	22	60	8.4	
	6	40	40	80	12	
	9	80	80	160	20	
D	10	22	12	60	6.4	0.5
	2					1
	11					3
	12	40	22	60	8.4	0.5
	5					1
	13					3

Cシリーズ： 主板厚と付加物板厚が共に変化

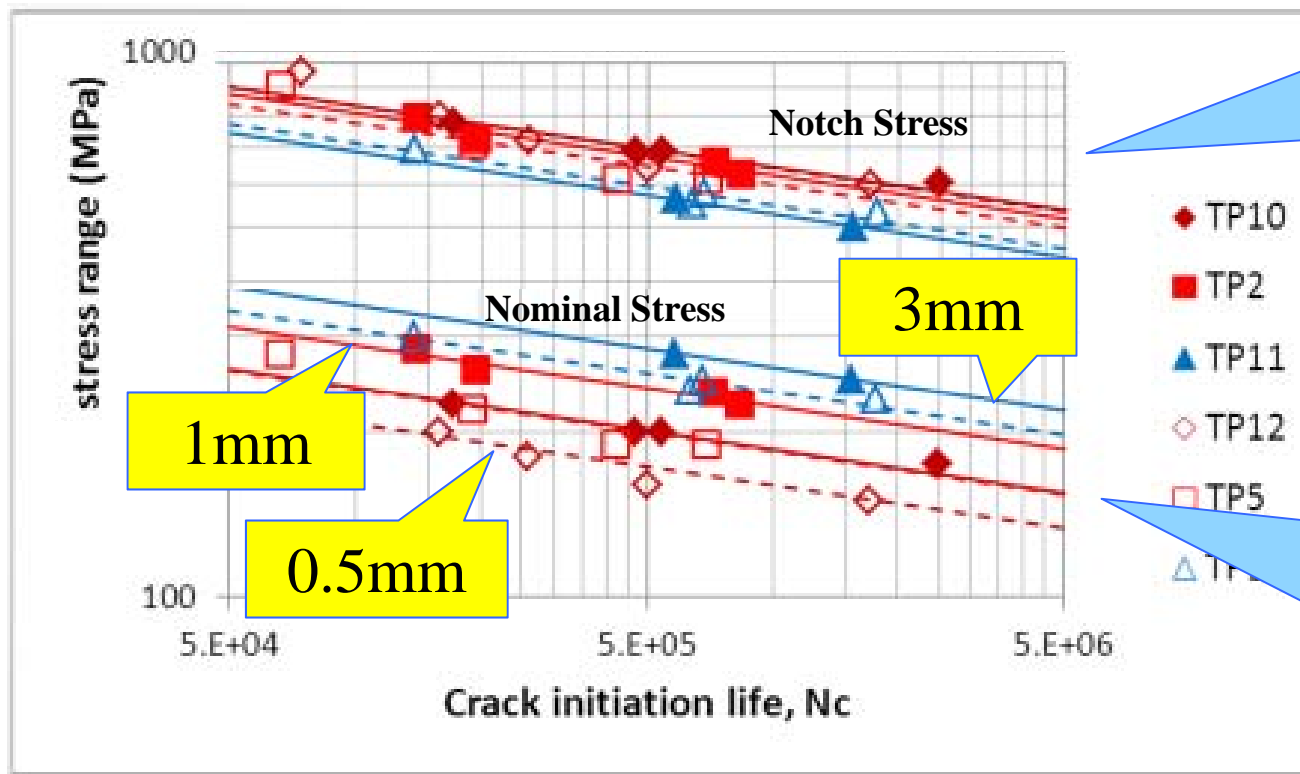


Aシリーズ： 主板厚変化、付加物板厚一定



公称応力、
ノッチ応力と
もに、明確な
板厚効果は
観察されず。

Dシリーズ： 止端形状変化

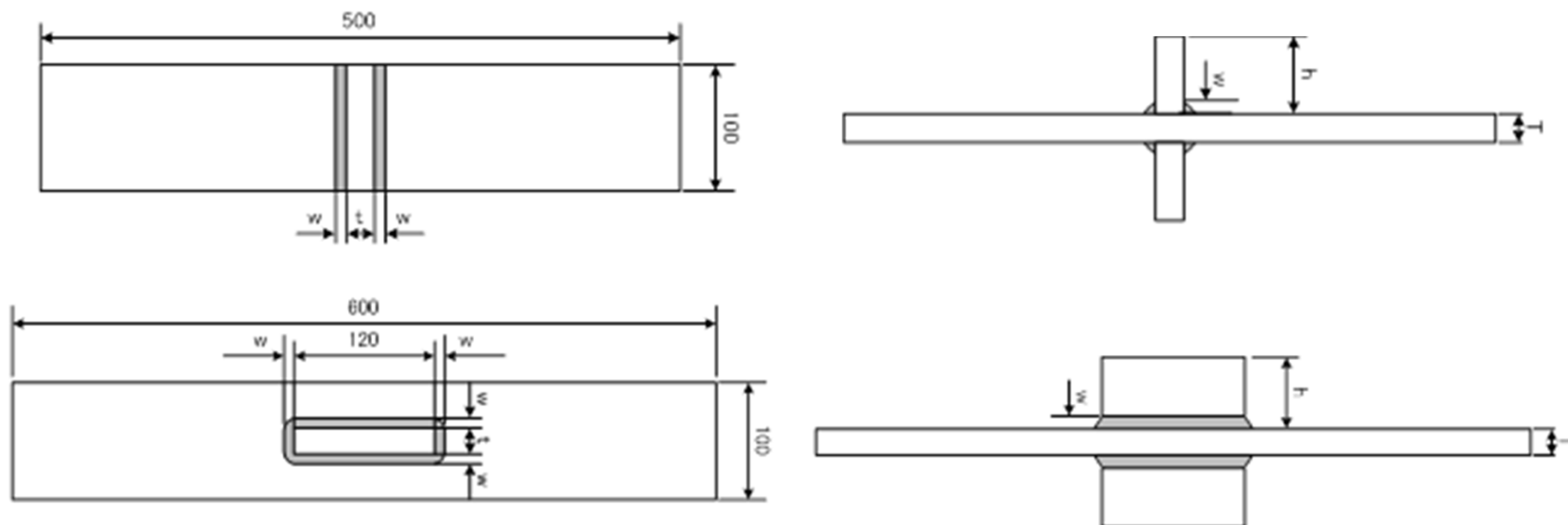


ノッチ応力で整理した場合、止端半径が大きい方が疲労強度小。

公称応力で整理した場合、当然ながら止端半径が大きいほど疲労強度大。

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) をした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

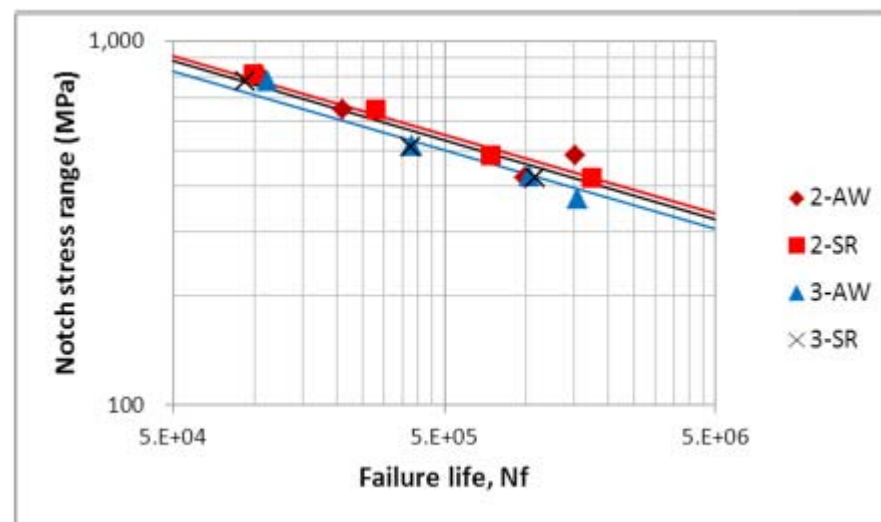
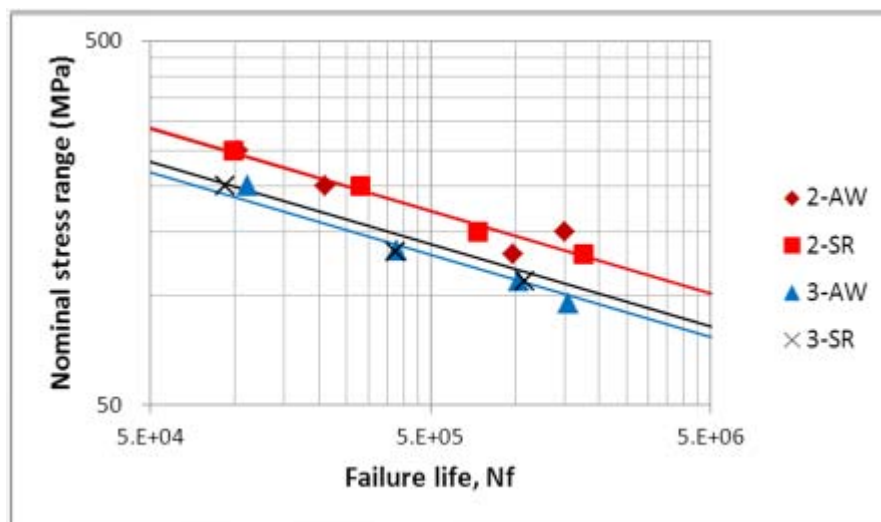
joint type	Test No.	main plate thickness	attached plate		Target weld length	Target toe radius
			thickness	height		
cruciform fillet welded joint	2-AW	40	22	60	8.4	1
	2-SR	40	22	60	8.4	1
	3-AW	40	80	160	12	1
	3-SR	40	80	160	12	1
out-of-plane gusset welded joint	5-AW	12	12	60	6.4	1
	6-AW	22	12	60	6.4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

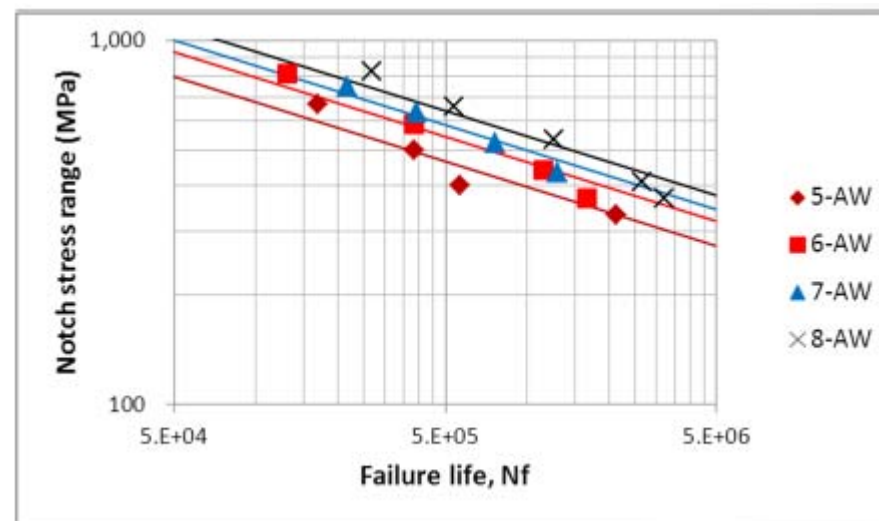
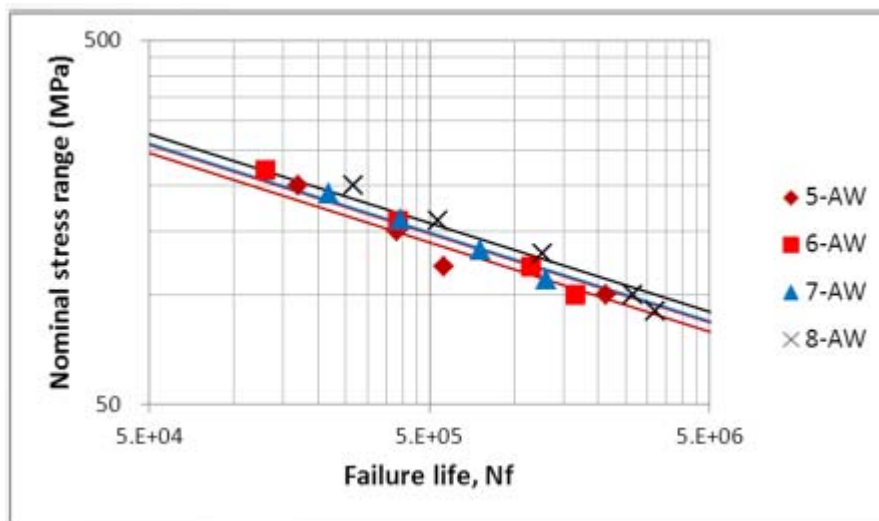
SR ; PWHTにより溶接残留応力除去を施した継手

十字隅肉溶接継手



- 公称応力で整理した場合(左図)、付加物板厚の疲労強度への影響が現れている。
- 溶接残留応力の影響はほとんど見られない。(AWとSRの差異)
- ノッチ応力で整理した場合(右図)、板厚効果は見られなくなる。

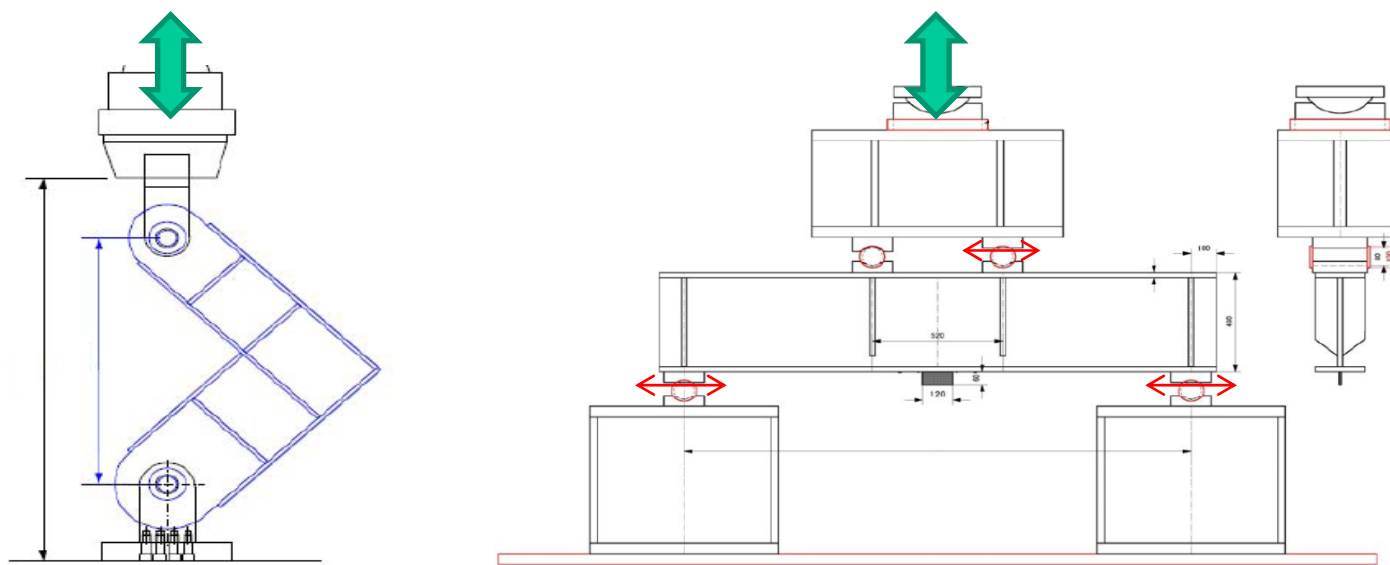
面外ガセット溶接継手



- 主板厚の変化する面外ガセット溶接継手では、板厚効果はほとんど見られない。
- しかしながら、ノッチ応力で整理した場合、主板厚が厚い方がやや長寿命となっている(Nf)。これは板厚が厚いことにより破断までの亀裂進展に時間を要したためと考えられる。

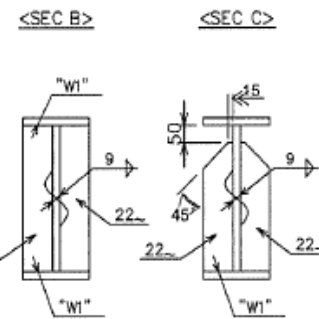
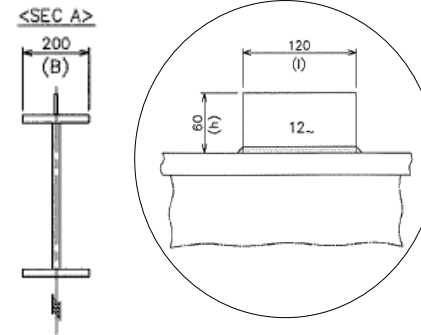
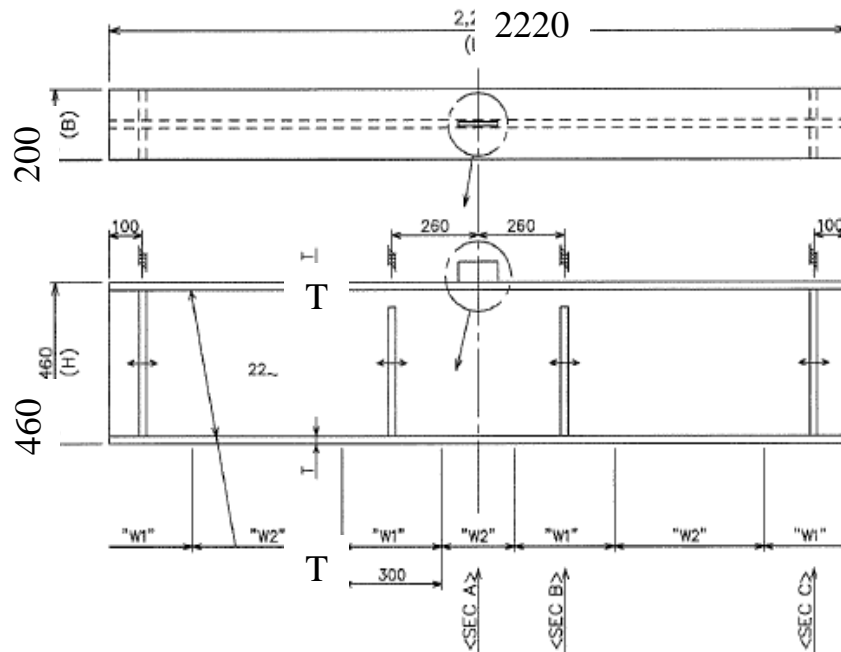
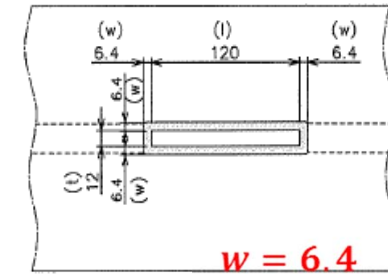
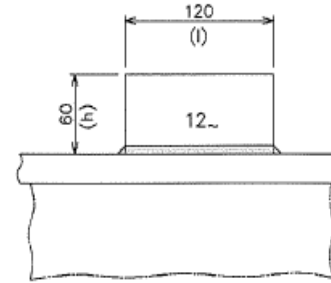
構造物試験

- 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）

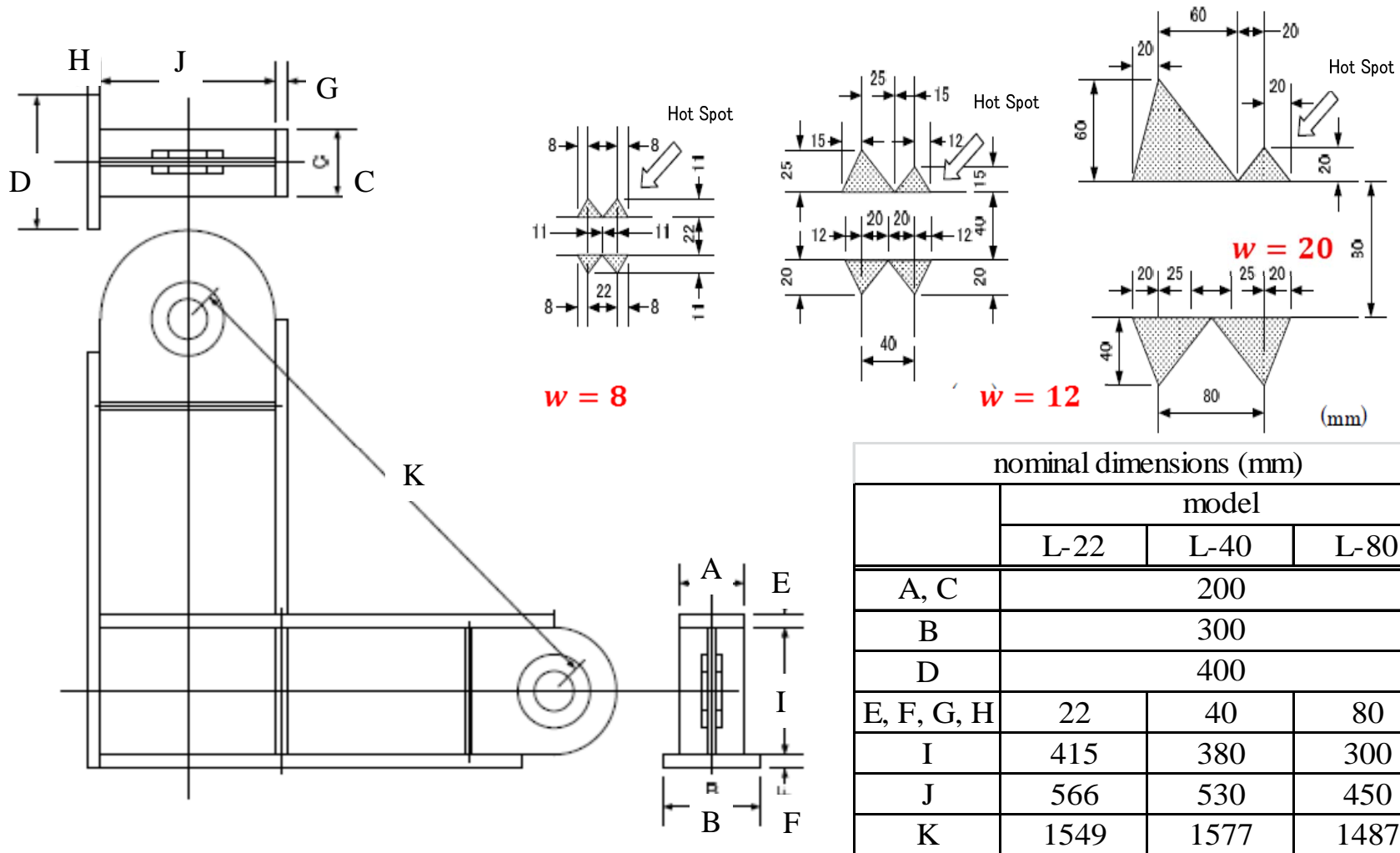


構造物試験 (I-type)

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

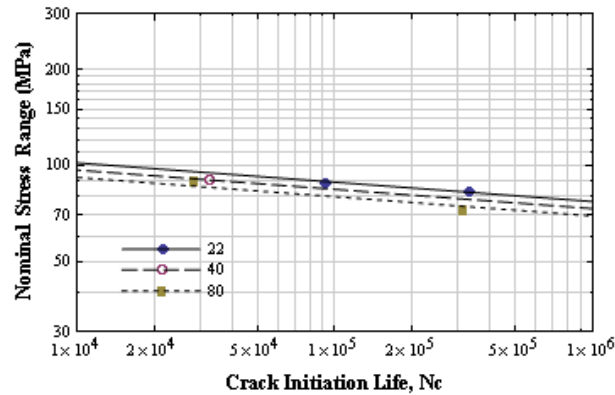


構造物試験 (L-type)

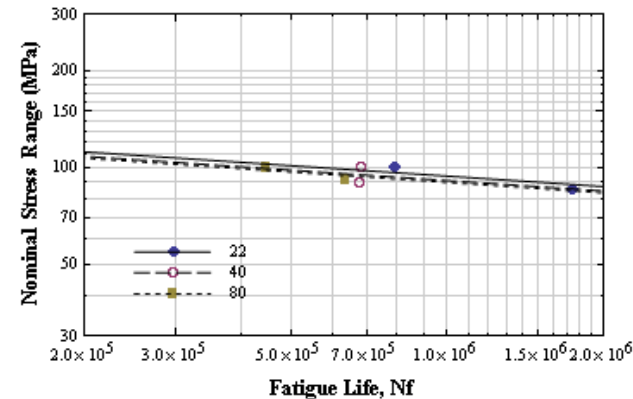


疲労試験結果 (構造物試験)

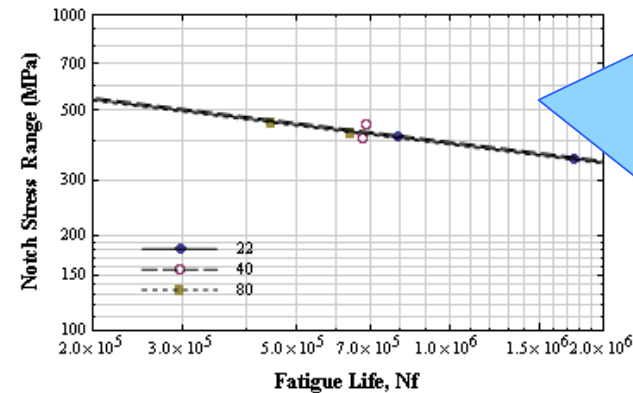
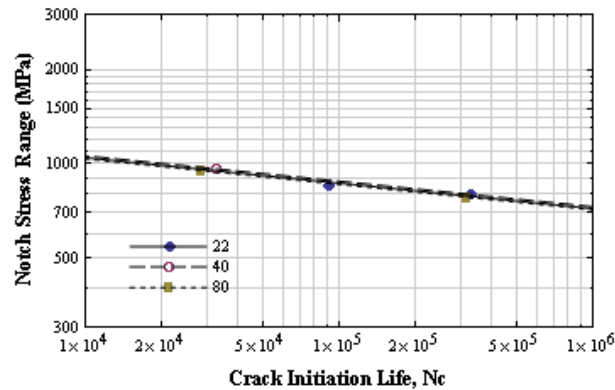
L-type structural model



I-type structural model



Relation between NOMINAL stress range and fatigue life

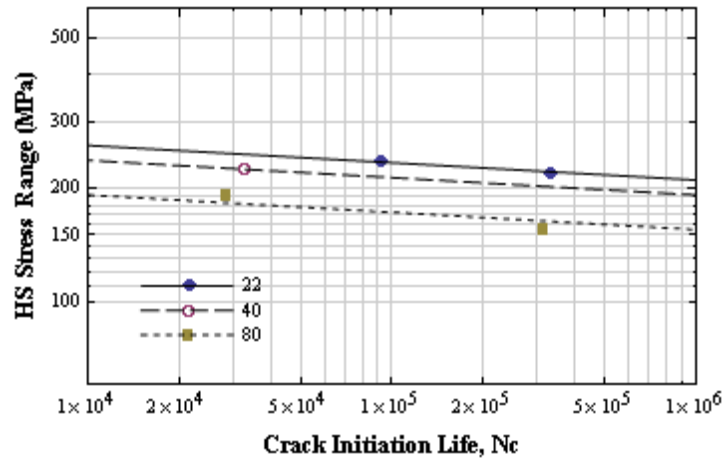


Relation between NOTCH stress range and fatigue life

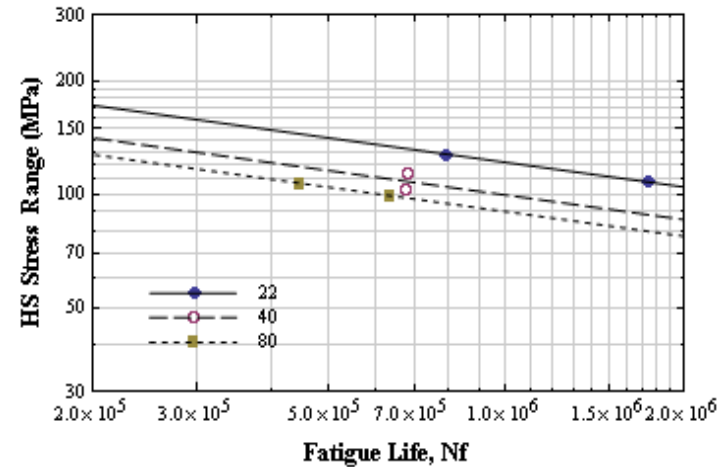
ハッチ応力で整理したら、ほとんど板厚効果は見られない。

⇒基礎試験、基本溶接継手試験からの知見の裏付け。

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

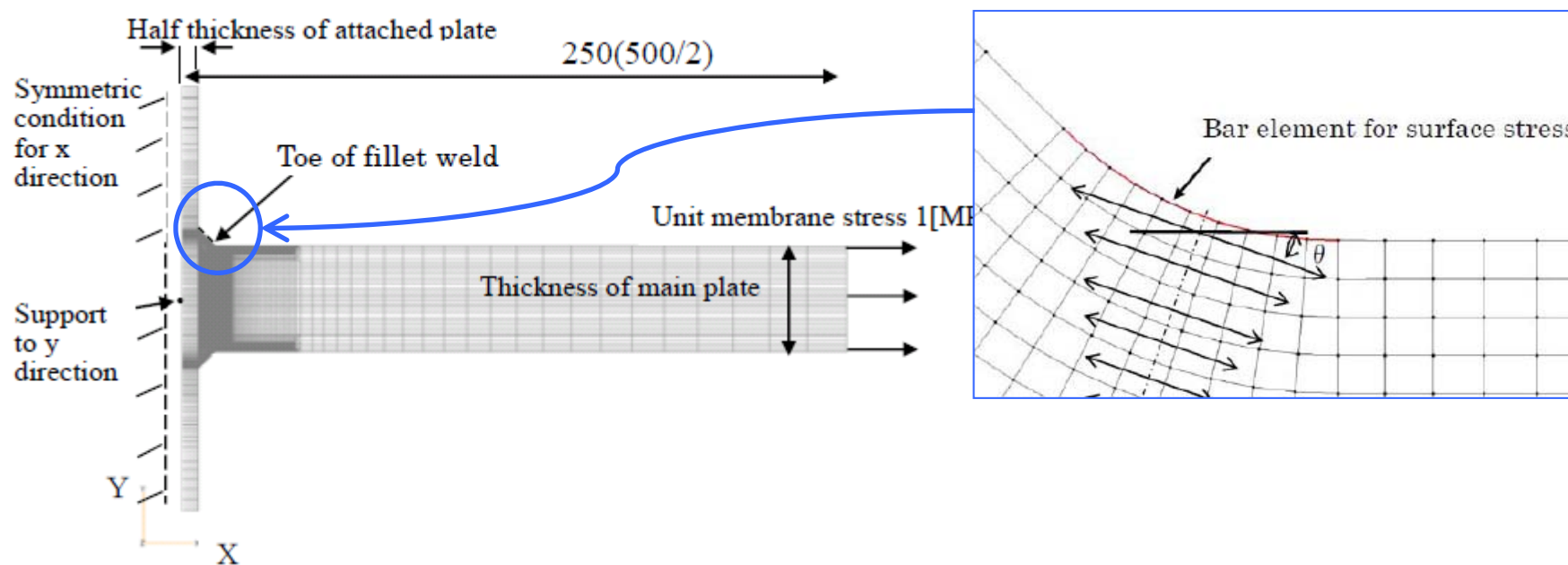
	I-type		L-type	
	HS	notch	HS	notch
22	1.27	4.10	2.03	9.68
40	1.14	4.51	1.91	10.70
80	1.07	4.57	1.84	10.79

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

FEMによる検証

FEMにより実験結果の検証を試みた。

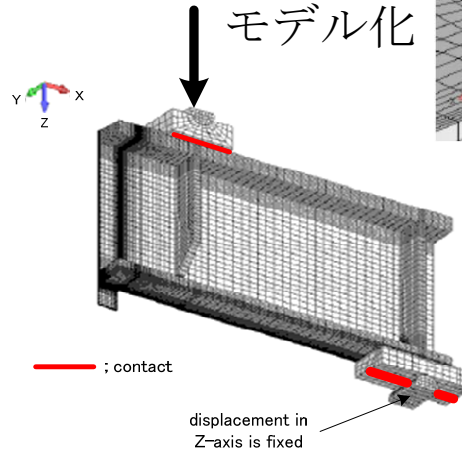
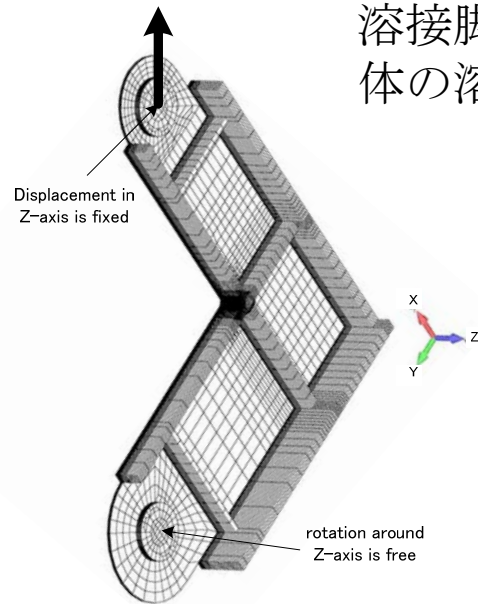
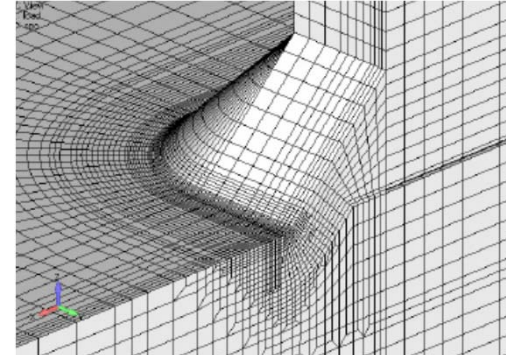
FEMにより応力集中係数 α と応力勾配 χ を算出。



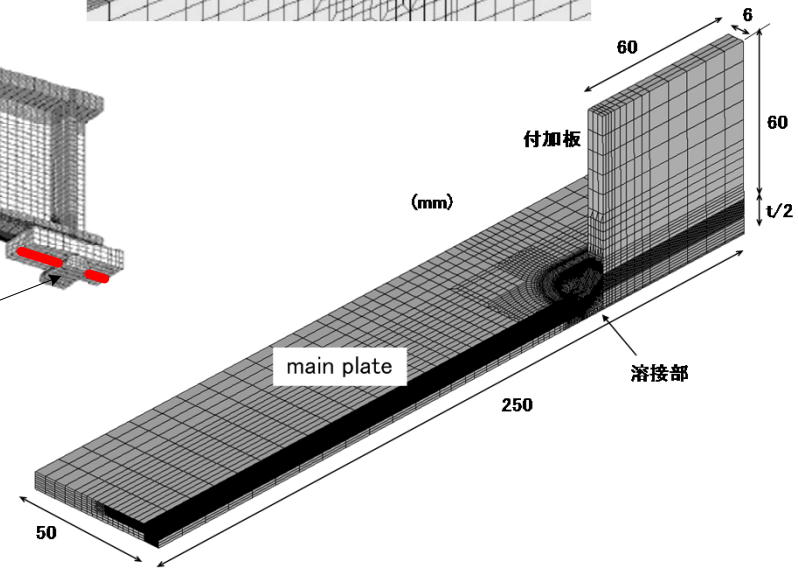
FE解析モデル

溶接部詳細

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

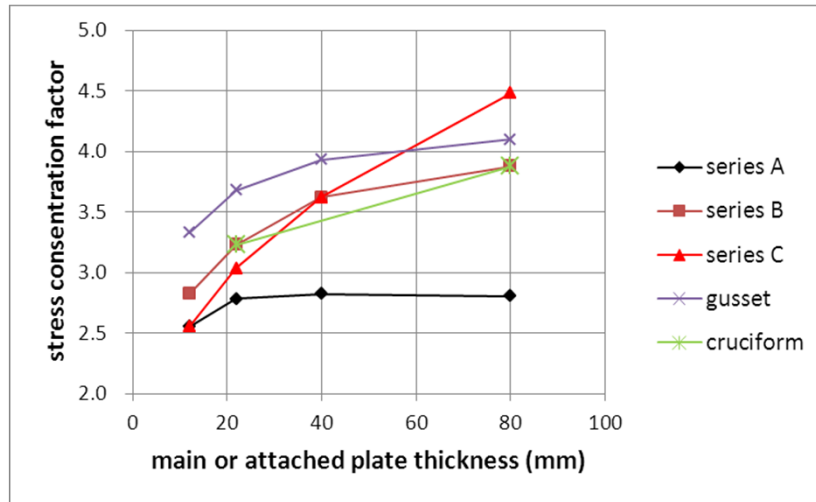


構造物試験

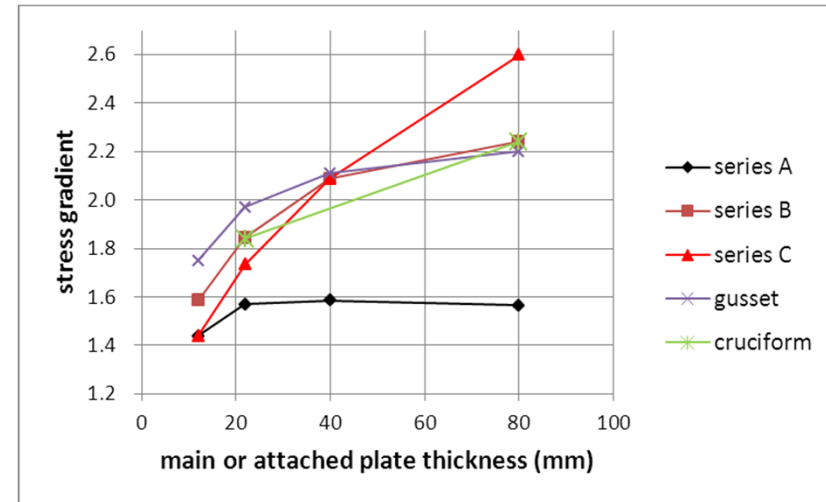


基本溶接継手試験

溶接止端部の集中係数と応力勾配



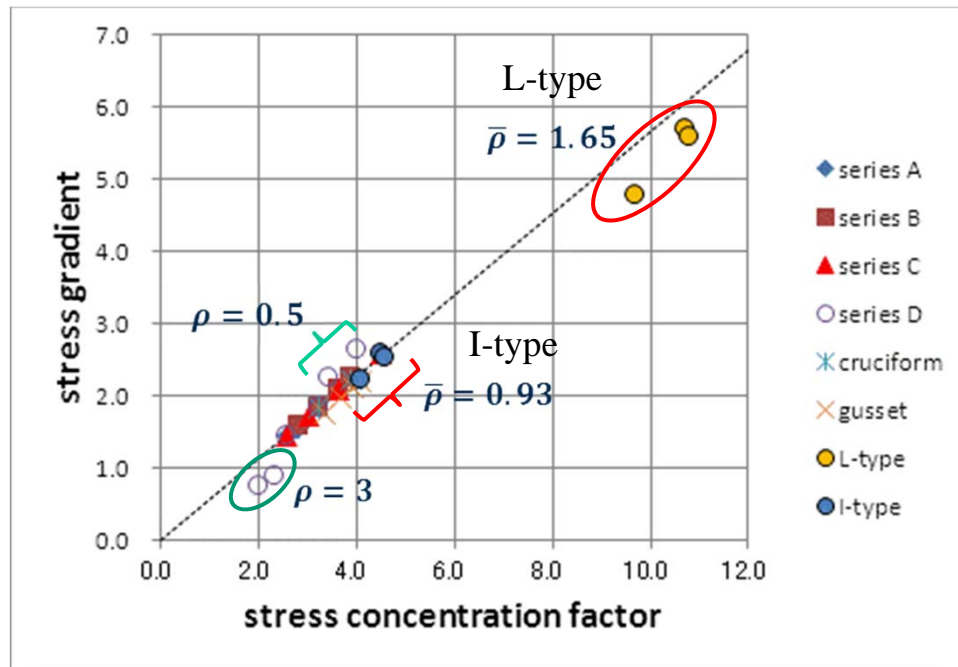
応力集中係数



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増加に応じて大きくなる
- 面外ガセット溶接継手の応力集中係数及び応力勾配は、板厚にほとんど依存しない

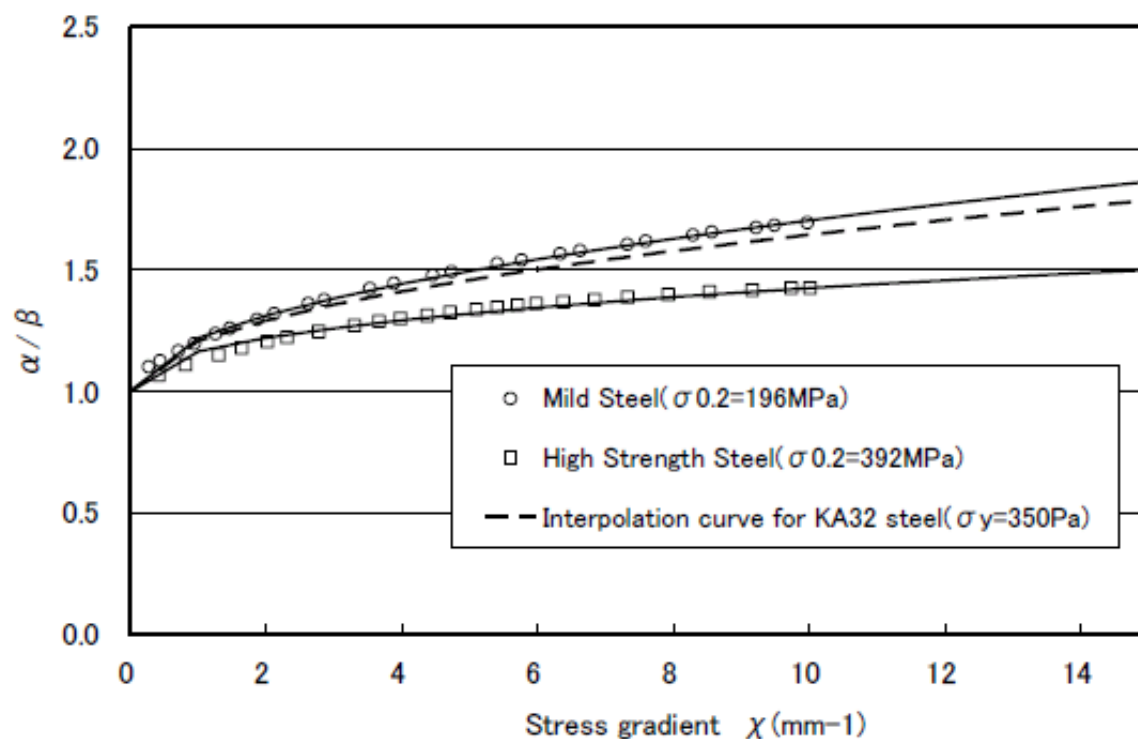
溶接止端部の集中係数と応力勾配



- 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

FEM結果から疲労強度減少係数の導出

Siebel線図を適用し、応力集中係数と応力勾配から疲労強度減少係数 β_{est} を導出。



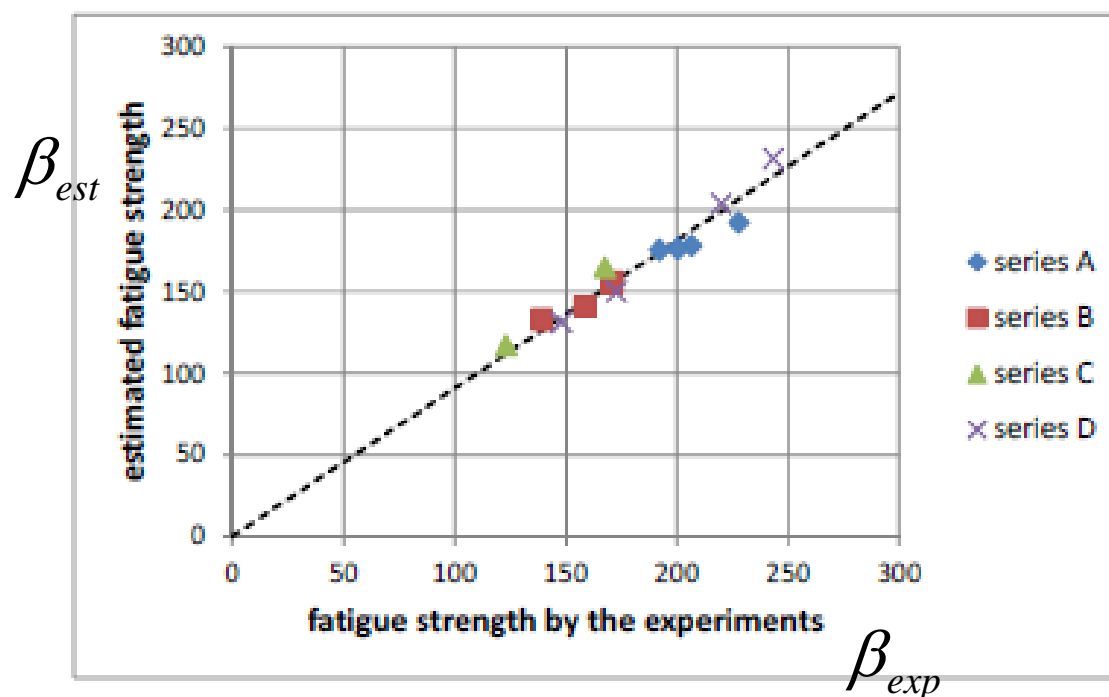
基礎試験における疲労強度減少係数の実験結果との比較

FEMにより求まる β_{est} を、実験結果に基づく β_{exp} と比較。

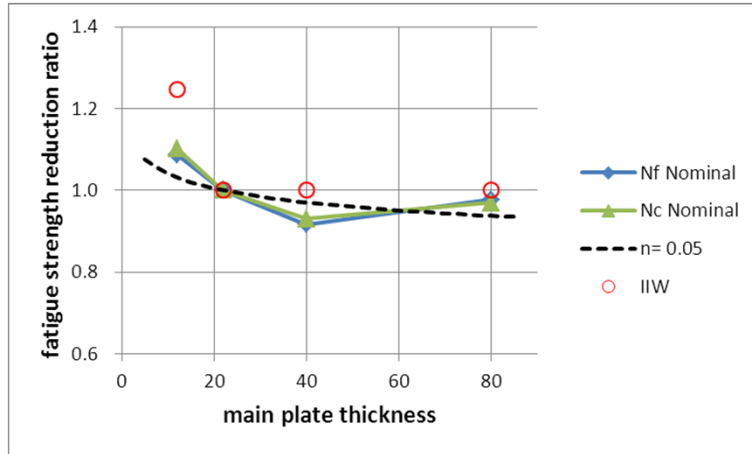
⇒良好な一致。疲労強度の低下は、応力集中係数と応力勾配で推定可能。



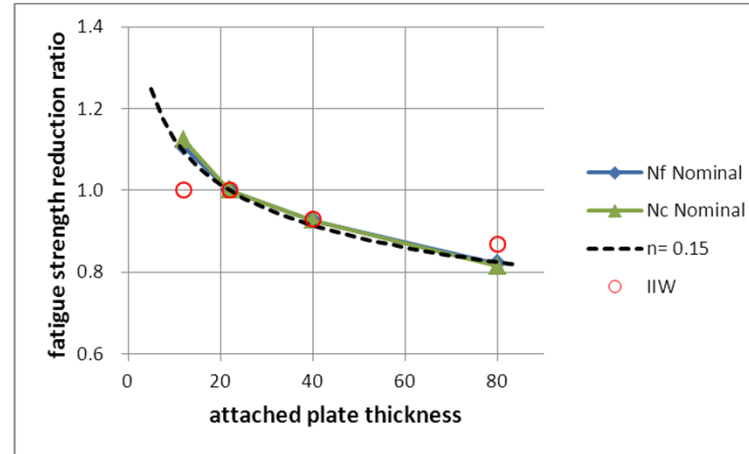
板厚効果は、応力集中係数と応力勾配で推定可能。



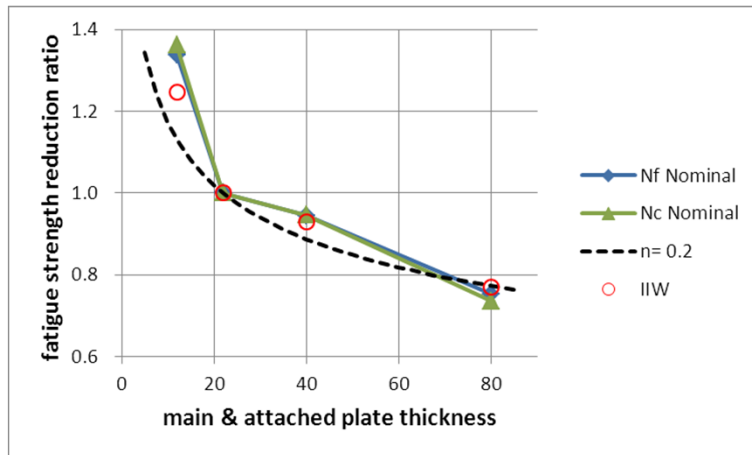
板厚影響の評価



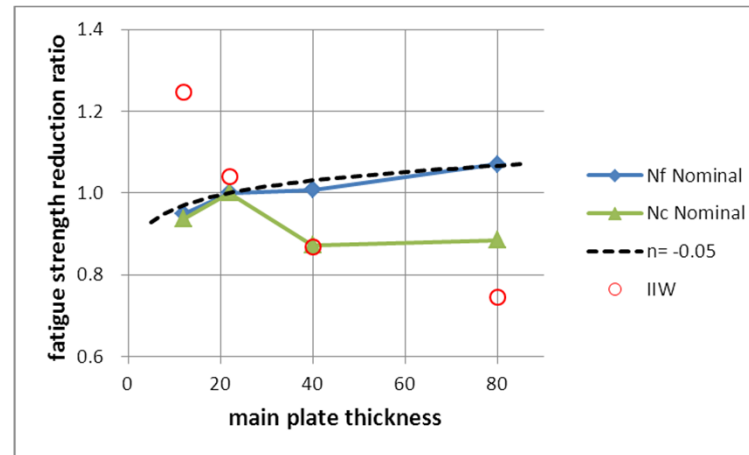
基礎試験, A シリーズ



基礎試験, B シリーズ

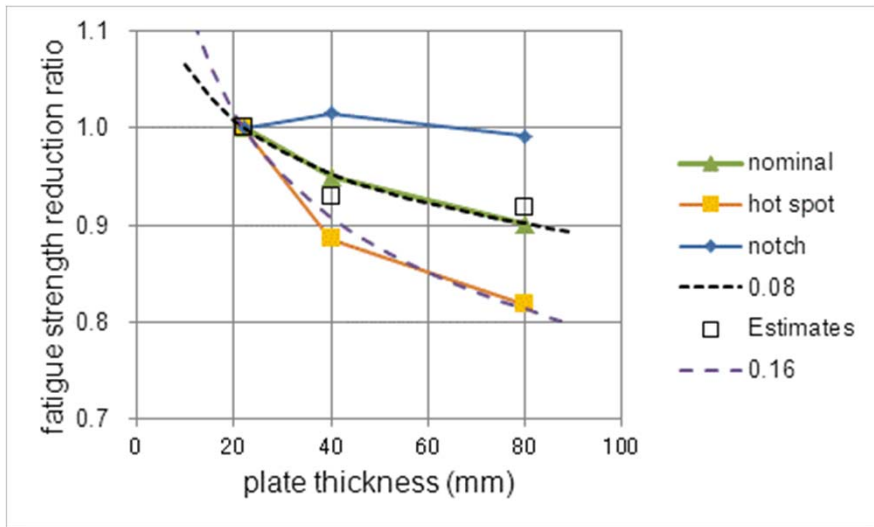


基礎試験, C シリーズ

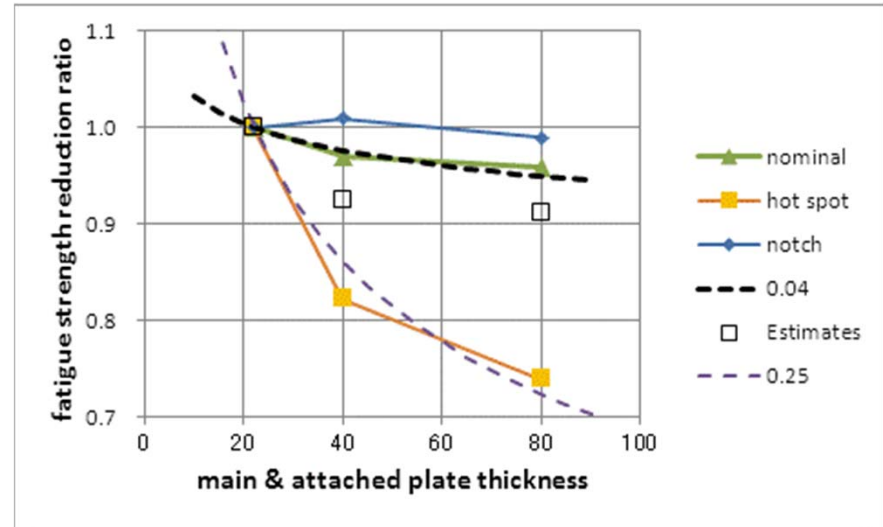


面外ガゼット溶接継手

板厚影響の評価



構造模型試験; L-type



構造模型試験; I-type

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。
- ✓ 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勾配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

本共同研究と時期が並行していたIACSにおける調和CSRの開発にあわせ、研究成果を随時適切に公表・フィードバックしたことにより、調和CSRドラフトにおいて、現行CSRより合理的な板厚効果評価手法を取り入れることができた。たとえば、

① 十字継手へのIIW手法の導入

$$\text{IACS CSR; } \frac{1}{f_{thick}} = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^n \quad t_{ref} = 22\text{mm}, \quad n = 0.25$$

$$\text{IIW; } f(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}(t, L)} \right)^n \quad t_{ref} = 25\text{mm}, \quad n = 0.3$$

$$t_{eff}(t, L) = \begin{cases} 0.5L & ; L/t \leq 2 \\ t & ; L/t > 2 \end{cases}$$

where L is the length between weld toes of the attached plate

- ② ガーダのウェブ直上に付加物が設置される場合、ロンジの横桁貫通部におけるロンジ面材とウェブ防撓材の取り合いなどの、板厚影響指数を現行の 0.25 から 0.1 へ。

調和CSRへのさらなるフィードバック

加えて、突合溶接継手、面外ガセット溶接継手、ビルジホッパ一部などの実構造物に対しても、応力集中と応力勾配の精査によって、板厚影響指数を見直すことができる。この趣旨に沿って、公表されたドラフトに対してさらに以下の提言を行なった。

Thickness effect for such applications can be verified using calculated stress concentration factors and stress gradients. The thickness effect exponents given in the draft harmonized CSR should be verified based on this approach, or the Rules should include description to allow application of this approach to establish thickness effect for each specific application.

Thank you for your attention!

ClassNK
R&D PROJECT

本研究開発は、日本造船工業会メンバー会社、製鉄会社、大学・研究機関および一般財団法人日本海事協会との共同研究体制により実施すると共に、同協会の「業界要望による共同研究スキーム」による支援を受けて実施しました。