

横突合せ溶接継手の疲労性能への内部欠陥の影響と要求品質レベルの設定

三木千壽¹・西川和廣²・高橋 実³・町田文孝⁴・穴見健吾⁵

¹フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 評価研究官 企画部
(〒305-0804 茨城県つくば市旭 1・現土木研究所 企画部長)

³正会員 修(工) 土木研究所 構造物研究グループ橋梁構造チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

⁴正会員 川田工業(株) 技術開発本部技術研究室
(〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11・現(財)首都高速道路技術センター)

⁵正会員 博(工) 東京工業大学大学院助手 理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1・現 LEHIGH 大学博士研究員)

鋼道路橋における溶接継手の疲労性能は、その溶接継手内部の品質に敏感であり、溶接継手内部の要求品質は疲労から決まると言える。内部欠陥が溶接継手の疲労性能に及ぼす影響を解明するために、最も重要な継手の一つである横突合せ溶接継手を対象に、溶接欠陥を内在させた溶接継手試験体の疲労試験を実施した。また、それらの結果を踏まえ、溶接継手内部の要求品質レベルの設定を試みた。

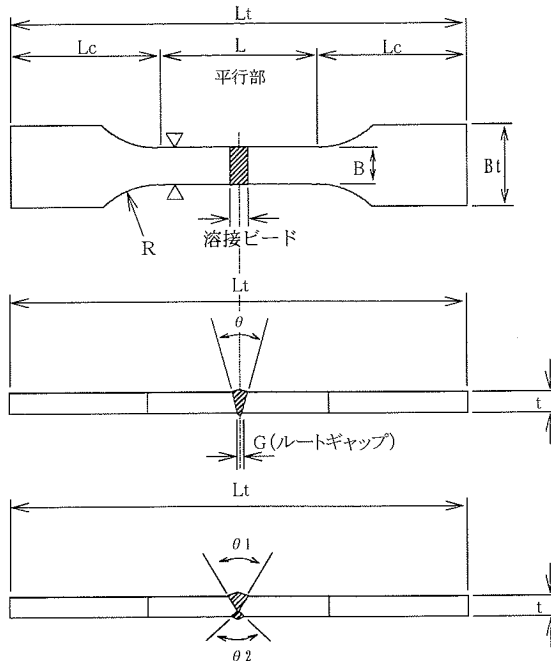
Key Words : *fatigue, butt-welded joint, defect, embedded-defect, allowable-defect-size, demand quality levels*

1. 序論

鋼溶接継手部にはさまざまな溶接欠陥が含まれる可能性がある。溶接欠陥はその種類や寸法によっては継手部の性能に影響を及ぼす可能性が出てくる。特に、疲労性能は溶接欠陥に敏感であり、溶接継手部に対する要求品質は疲労から決まると言える。溶接継手のうちでも最も重要な突合せ溶接継手の疲労強度に及ぼす溶接欠陥の影響については、多くの研究が行われてきた¹⁾⁻⁵⁾。しかし、継手部の疲労性能の要求に対して許容欠陥を設定するといったような、定量的な評価についてはさほど明らかにされていないのが現状である。国際溶接協会 (IIW) は 1989 年に溶接継手部の要求強度とそれに対する製作、検査を結びつけた“合目的設計”のドラフトを発表しているが、いまだドラフトのままである⁶⁾。溶接継手部の疲労に対する欠陥の影響評価については IIW の疲労部門委員会 (XIII) の第 2 ワーキンググループ (WG2) のテーマとして、調査研究が進め

られているところである。

我国では、近年、鋼少数主桁形式の採用に伴って、75mm を超えるような厚板を現場溶接するような事例が増加しており、突合せ溶接継手部の要求品質について、それに対する非破壊検査方法を含めて、より定量的な評価についての要望が高まっている⁷⁾。平成 14 年 3 月より以前の、例えば平成 8 年 12 月の道路橋示方書Ⅱ鋼橋編 15 章施工「15.3.3 溶接」では、“放射線透過試験の場合で引張応力を受ける場合 JIS Z 3104:1995 附属書 4「透過写真によるきずの像の分類方法」に示す 2 類以上、圧縮応力を受ける場合 3 類以上”を受け入れ基準としている。また、超音波探傷試験の場合についてはその解説中に“引張応力の場合 JIS Z 3060:1994 附属書 6「試験結果の分類方法」に示す 2 類以上、圧縮応力の場合 3 類以上”を受け入れ基準とすることが述べられている。しかし、これらは疲労を主として考慮したものではなく、疲労が要求性能の一つとなる場合にはそれに対応した品質管理基準を設ける必要が出てくる。



溶接部の余盛り、裏液はそのまま残した。
但し、一部の試験体は止端仕上げした。

図-1 試験体の形状と寸法

表-1 試験体諸元

鋼種	開先形状	試験体数	t (mm)	B (mm)	B/t	L (mm)	L/B	$\theta 1^*$ (度)	$\theta 2$ (度)	Lt (mm)	Lc (mm)	Bt (mm)	R (mm)	G* (mm)
SM490A	V	100	25	40	1.6	170	4.25	30	-	500	165	90	100	7
SM570QT	V	49	25	40	1.6	170	4.25	30	-	500	165	90	100	7
SM570QT	X	13	25	40	1.6	170	4.25	60	90	500	165	90	100	-
SM490C	X	48	50	80	1.6	200	2.5	30	-	1000	400	130	200	7
SM570QT	V	12	50	80	1.6	200	2.5	60	60	1000	400	130	200	-
SM490C	V	6	75	120	1.6	300	2.5	30	-	1800	750	300	200	7
SM570QT	V	6	75	120	1.6	300	2.5	30	-	1800	750	300	200	-
SM490C	V	3	100	160	1.6	400	2.5	30	-	1800	700	400	200	7
合計		237												

ここで、*の値は標準値を示しており、欠陥種類によって異なる。詳細は図-3を参照。

表-2 鋼材の化学成分と機械的性質（ミルシート値）

鋼種	開先形状	t (mm)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Nb (%)	V (%)	YP (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	vE ₀ (J)	vE ₋₅ (J)
SM490A	V	25	0.17	0.44	1.44	0.013	0.006	-	-	-	-	-	-	343	532	33	-	-
SM570QT	V	25	0.13	0.22	1.24	0.013	0.002	0.01	0.01	0.11	0.00	-	0.03	595	667	27	-	294
SM570QT	X	25	0.07	0.20	1.23	0.008	0.002	-	-	0.22	0.20	-	0.04	643	685	27	-	282
SM490C	V	50	0.15	0.44	1.44	0.007	0.002	0.01	0.02	0.03	0.00	0.02	0.04	420	575	34	146	-
SM570QT	X	50	0.07	0.20	1.23	0.008	0.002	-	-	0.22	0.20	-	0.04	563	638	28	-	316
SM490C	V	75	0.17	0.48	1.43	0.012	0.002	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.06	385	541	35	196	-
SM570QT	V	75	0.07	0.19	1.37	0.006	0.001	0.01	0.01	0.27	0.26	-	0.03	539	631	27	-	232
SM490C	V	100	0.18	0.48	1.43	0.013	0.002	0.01	0.01	0.02	0.00	0.04	0.06	380	544	32	159	-

表-3 溶接材料の化学成分と機械的性質（ミルシート値）

ワイヤの種類	適用鋼種	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Ti+Zr (%)	YP (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	vE ₀ (J)	vE ₋₅ (J)	vE ₋₂₀ (J)
JIS Z 3313 YFW-C50DR	SM490	0.04	0.51	1.49	0.015	0.010	0.015	-	-	-	-	496	567	30	108	-	-
JIS Z 3312 YGW11	SM490	0.06	0.67	1.49	0.015	0.020	0.210	-	-	0.003	0.22	528	570	26	124	-	-
JIS Z 3313 YFW-C60FR	SM570QT	0.05	0.55	1.65	0.009	0.008	0.210	0.53	0.01	-	-	620	663	24	-	95	-
JIS Z 3313 YFW-C602R	SM570QT	0.04	0.40	1.40	0.011	0.008	0.023	1.02	0.08	-	-	562	629	28	-	-	73
JIS Z 3312 YGW21	SM570QT	0.05	0.67	1.98	0.013	0.013	0.183	-	0.38	0.009	0.19	641	691	25	-	98	-

ここで、JIS Z 3312: 1999の化学成分は製品分析により、JIS Z 3313: 1999の化学成分は溶着金属の分析により得られた値である。

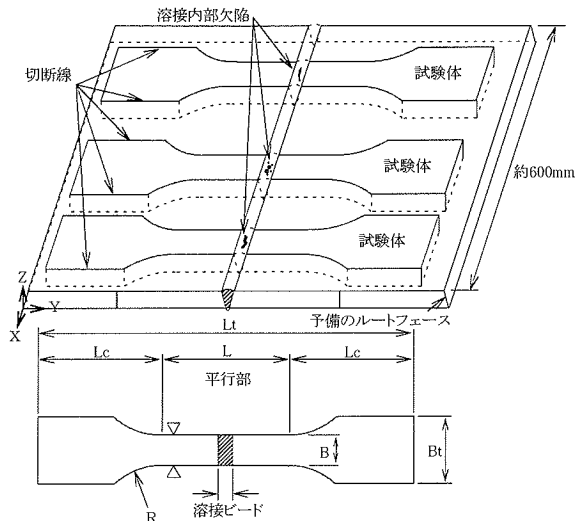
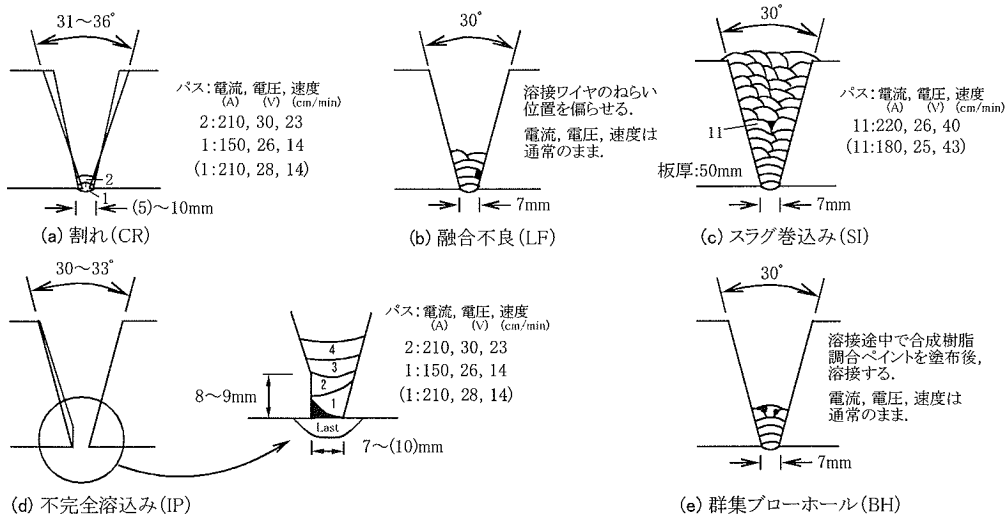


図-2 試験体作成要領



カッコ()内の数値は、欠陥を内在させる位置での値である。

図-3 欠陥を内在させる方法

本研究では各種の溶接欠陥を内在させた溶接継手部の疲労試験から疲労性能に対する欠陥の影響を検討するとともに、設計許容応力に対応した受け入れ限界欠陥寸法を提案する。平成 14 年 3 月の道路橋示方書Ⅱ鋼橋編⁸⁾および平成 14 年 3 月の鋼道路橋の疲労設計指針⁹⁾の関連する条文や指針は本研究をベースとしている。なお、SM490 鋼材の V 形開先溶接継手(板厚 $t=25\text{mm}$)についての結果は既発表¹⁰⁾であるが、ここではその他の結果も含めて報告する。

2. 試験体, 試験の方法

(1) 試験体

図-1, 表-1 に試験体の形状と寸法を示す。試験材は板厚 25, 50 および 75mm であり、各々鋼材は SM490 と SM570 の 2 種類である。それぞれの鋼材の化学成分と機械的性質を表-2 に示す。溶接の開先形状は現場溶接を想定して片面 V 形を主とし、一部 X 形開先も用いている。溶接は CO_2 ガスシールドアーク溶接による多層盛り溶接である。用いた溶接材料の化学成分と機械的性質を表-3 に示す。試験材は図-2 に示すように幅約 600mm の板 2 枚を、想定

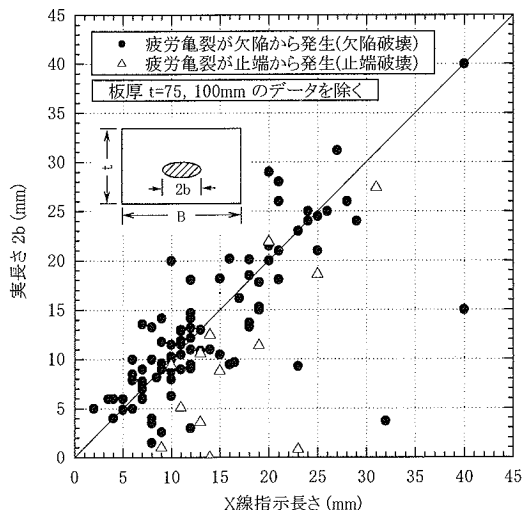


図-4 欠陥寸法(指示長さとお実長さ)の比較

した欠陥を含むように溶接した後、放射線透過試験を行い、適切な欠陥を含む部分を切り出し、試験体に加工した。

内在欠陥の種類は割れ(CR)、融合不良(LF)、不完全溶込み(IP)、スラグ巻き込み(SI)、および群集ブローホール(BH)の5種類である。溶接欠陥の位置は実際の現場継手での検査記録を参考にして決めている。すなわち、割れ(CR)は初層溶接ビード内、不完全溶込み(IP)は初層の開先面に沿った位置、その他は溶接部全体に分布させている。また、欠陥の位置、特に割れの位置の影響を検討する目的でX形開先の溶接継手も加えている。

図-3に試験体へ欠陥を内在させる方法(片面V形開先)を示す(図中の数値は一例を示している)。

割れ(CR)は2種類の方法で溶接部初層に内在させている。1つは、割れを内在させる部分の開先角度を割れを内在させない部分の開先角度と比べて5°程度狭開先に整形した後、割れを内在させる部分を溶接する際、電圧や溶接速度は通常のみで、電流を通常の1.5倍程度にして溶接することで割れを発生させている(図-3参照)。もう1つの方法は、割れを内在させる部分を溶接する際、開先角度は変更せず、電圧は通常のみで電流と溶接速度を共に通常の1.5倍程度にして溶接することで割れを発生させている。

融合不良(LF)は、初層以外のパス間の溶込不足とし、溶接ワイヤの狙い位置をどちらか片方の開先に偏らせて操作することで内在させている。

不完全溶込み(IP)は、溶込不足を内在させる部分の片方の開先に高さ約8mmのルートフェースを設

表-4 放射線透過試験の撮影条件

板厚	25mm	50mm	75mm
X線装置	RF300EG-S2		
X線フィルム	#100	#100	#100
増感紙	Pb0.03	SMP-308	SMP-308
集点・試験体距離	728mm	750mm	778mm
管電圧	250KV	300KV	300KV
露出時間・条件	2min	5min	5min
現像条件	ハイレントール 20°C, 5min	ハイレントール 20°C, 5min	ハイレントール 20°C, 5min

但し、板厚50mmおよび75mmの試験体では欠陥を内在させた時点(溶接途中の時点)における多層盛り溶接部に対して、放射線透過試験を実施した。

け、初層の狙い位置を操作することで内在させている。但し、欠陥が目視で確認できないように、初層の不完全溶込みの上から1パス分だけ溶接した。

スラグ巻き込み(SI)は、溶接ワイヤの狙い位置を操作させると共に、電流と溶接速度は共に通常のみで電圧を通常の0.8倍程度にして溶接することで、隣り合うパス間に凹部を生じさせ、その部分のスラグ除去を困難にさせることで内在させている。

群集ブローホール(BH)は、溶接位置に合成樹脂調合ペイントを塗布することで内在させている。

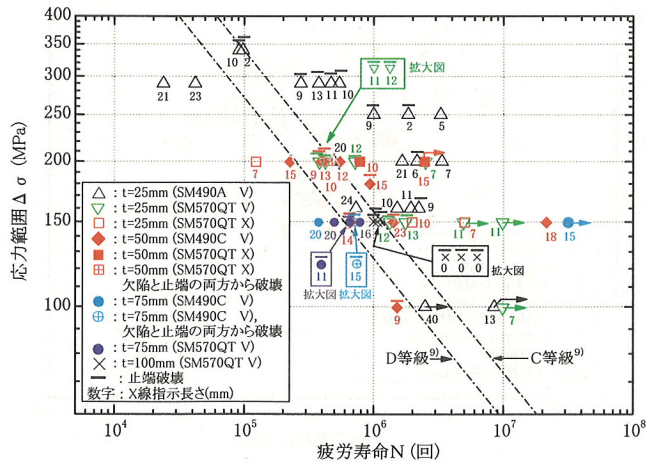
(2) 試験の方法

疲労試験は一定振幅荷重下で行い、荷重速度は5~15Hz、荷重波形は正弦波とした。疲労試験での応力比(R)は、一部の試験体を除き、ほぼ0である。また、一部の試験体については疲労亀裂の進展性状を観察する目的で一定の荷重回数毎に最大荷重を一定としたまま荷重範囲を1/2とするピーチマーク試験を実施している。

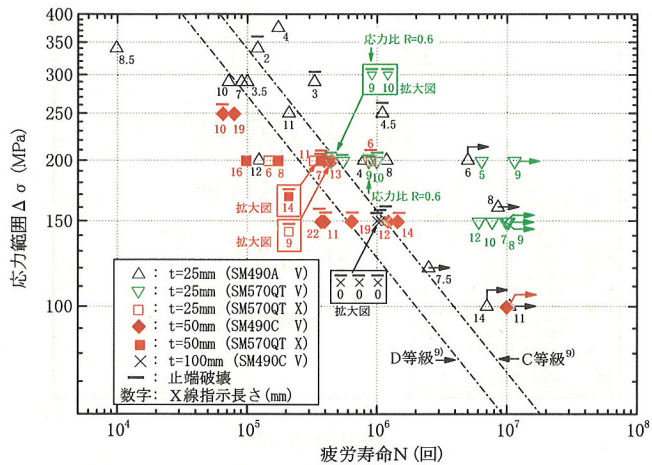
3. 疲労試験の結果とその考察

(1) 溶接欠陥の実寸法と放射線透過試験による指示長さの関係

図-4に継手試験体中に含まれていた溶接欠陥の放射線透過試験による指示長さ(X線指示長さ)とお実長さとの関係を示す。放射線透過試験は鋼溶接継手の放射線透過試験方法(JIS Z 3104:1995)に従って実施した。表-4に撮影条件を示す。隣接欠陥の扱いはJIS Z 3104:1995 附属書4「透過写真によるきずの像の分類方法」に従った。X線指示長さは、継手中の最大長さを示している。一方、実長さは、疲労亀裂が内在欠陥から発生し、それが進展して破断した試験体については、破断面に現れた欠陥を直接に測定し、止端からの疲労亀裂により破断し



(a) 欠陥種別：割れ (CR)



(b) 欠陥種別：融合不良 (LF)

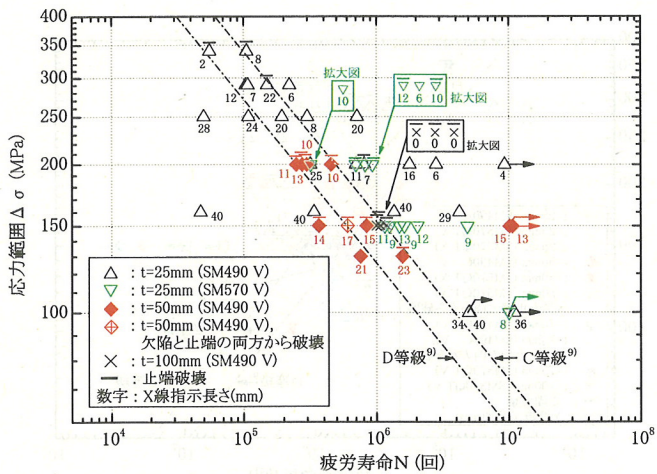
図-5 疲労試験結果 (その1)

た試験体については、試験後溶接線直角方向に試験体をフライス盤により0.5mmピッチで切削し切削面をマクロ組織観察して欠陥の有無を確認することからその長さを測定した。実長さが指示長さよりかなり短い試験体があるが、これらは試験体製作時に対象欠陥の位置を誤判定した可能性や、止端破壊の場合にはマクロ組織観察での測定の誤差の可能性も考えられる。また、JISに示される放射線透過試験により得られる欠陥指示長さ(X線指示長さ)はフィルム面に投影された長さであり、欠陥の幅方向や板厚方向の情報を含んでいない。従って、放射線透過試験による指示長さ(X線指示長さ)と実寸法は異なることがあり、必ずしも全て一致するというこ

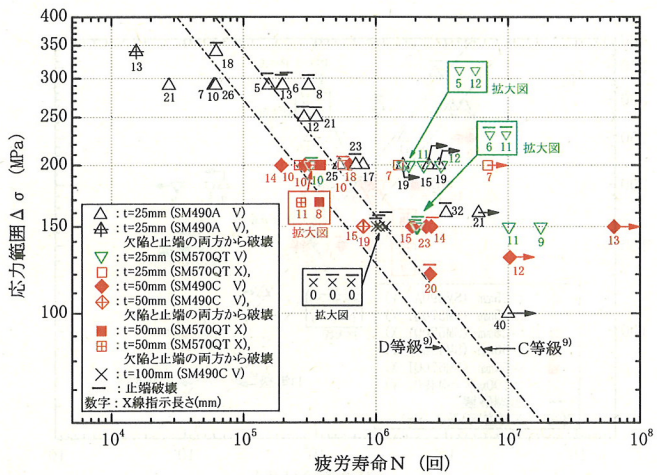
にはならない。

(2) 継手の疲労強度

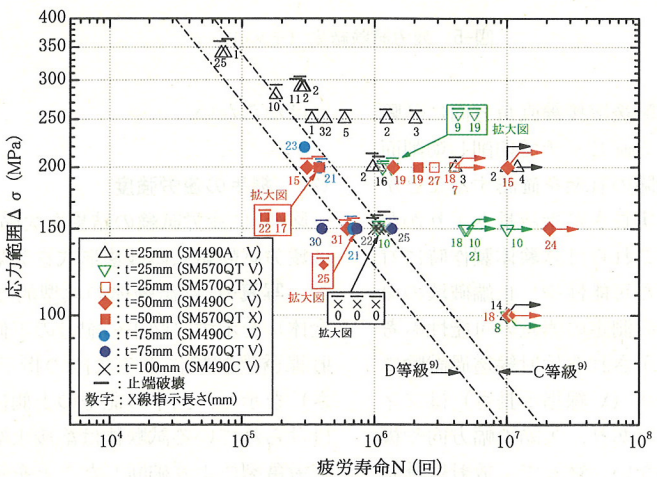
図-5に疲労試験の結果を欠陥種別毎に示し、表-5に疲労試験結果の破壊形式を欠陥種別毎に示す。また、写真-1に試験体の典型的な疲労破面(破面の全体)を示す。図中の記号の下側に付けた数値は放射線透過試験による欠陥の指示長さ(X線指示長さ)を示し、図中の記号の上側にバー(記号 $\bar{\quad}$)が付けられている試験体は溶接止端表面から発生した疲労亀裂により破断したことを示す。記号が重なる部分は拡大図を図中に示した。板厚が100mmの試験体は無欠陥のため、すべての欠陥種別の図に示した。



(c) 欠陥種別：不完全溶込み (IP)

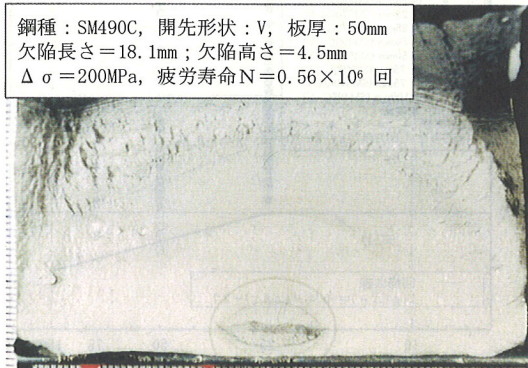


(d) 欠陥種別：スラグ巻き込み (SI)



(e) 欠陥種別：群集ブローホール (BH)

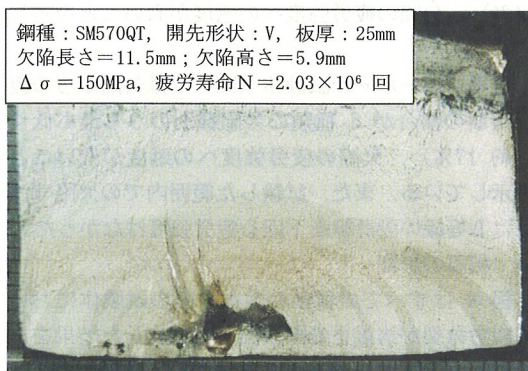
図-5 疲労試験結果 (その2)



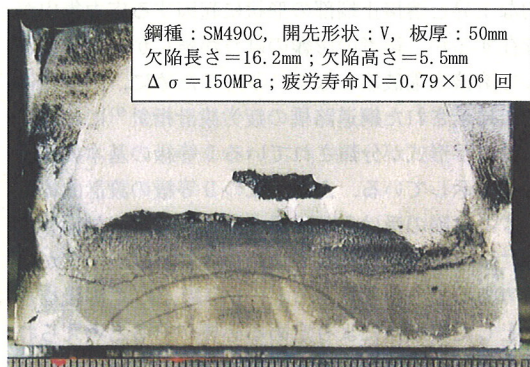
(a) 欠陥種別：割れ (CR)



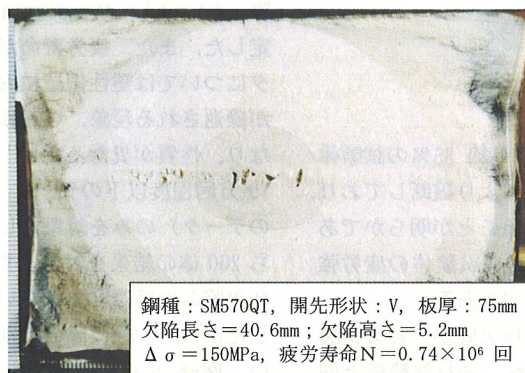
(b) 欠陥種別：融合不良 (LF)



(c) 欠陥種別：不完全溶込み (IP)



(d) 欠陥種別：スラグ巻き込み (SI)



(e) 欠陥種別：群集ブローホール (BH)

写真-1 疲労破面

表-5 疲労試験における破壊形式

試験体の種類	破壊形式	欠陥破壊(%)	止端破壊(%)
割れ(CR)		35	65
融合不良(LF)		25	75
不完全溶込み(IP)		62	38
スラグ巻込み(SI)		54	46
群集ブローホール(BH)		17	83

表中の数値は、板厚50mm以上の試験体に対するものである。また、止端仕上げした試験体および未破壊の試験体の結果は含まれていない。なお、止端仕上げした割合は、全試験体の約20%である。

図中の記号に右向きの矢印(記号→)が付けられている試験体は未破壊であることを示す。疲労亀裂が溶接止端表面から発生することは通常の破壊モードであり、内在欠陥が継手の疲労性能に対して影響しなかったことを示している。すなわち、疲労亀裂の発生原因としては、溶接内在欠陥による応力の局所的な上昇と溶接止端部の形状に起因する応力集中が存在するが、後者の影響のほうが厳しかった結果として溶接止端破壊となる。参考のために、図中には新たに示された鋼道路橋の疲労設計指針⁹⁾においてこの継手形式が分類されているD等級の基本疲労設計線を示している。また、このD等級の設計曲線に対する欠陥の受け入れ限界寸法としては、材料や溶接による疲労試験結果のばらつきや試験データが少数であることを考慮すると、1等級上のC等級を基準とした実験値により定める必要があると考えられるため、図中にはC等級の基本疲労設計線も併記している。なお、この設計指針⁹⁾における継手等級分類は(社)日本鋼構造協会(JSSC)の鋼構造物の疲労設計指針・同解説¹¹⁾のそれをベースとしており、両者はほとんど同じである。

(3) 影響因子に関する考察

a) 欠陥の種類の影響

割れ試験体(CR)では表-5より約35%の試験体が割れを発生点とした疲労亀裂により破断しており、溶接割れは疲労強度を低下させることが明らかである。また、図-5より欠陥が大きい試験体の疲労強度はD等級の設計線を下回る傾向がある。

融合不良試験体(LF)では溶接欠陥から疲労亀裂が発生する割合は約25%であり、割れ試験体と同様に欠陥寸法が大きくなるとD等級の設計線を下回る疲労強度となっている。

不完全溶込み試験体(IP)では欠陥からの疲労破壊の割合は5種類の欠陥種別のうち最も高く(約62%)、欠陥の疲労強度への感度が高いことを示している。

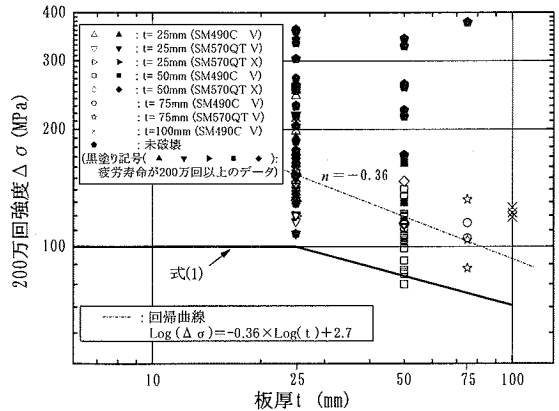


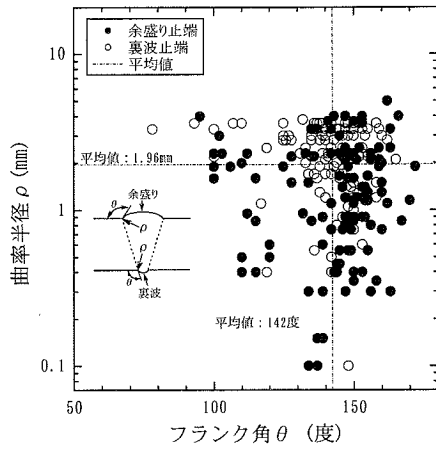
図-6 板厚の疲労寿命に対する影響

スラグ巻込み試験体(SI)は欠陥からの疲労破壊の割合が不完全溶込み試験体(IP)の次に高く(約54%)、欠陥の疲労強度への感度が高いことを示している。

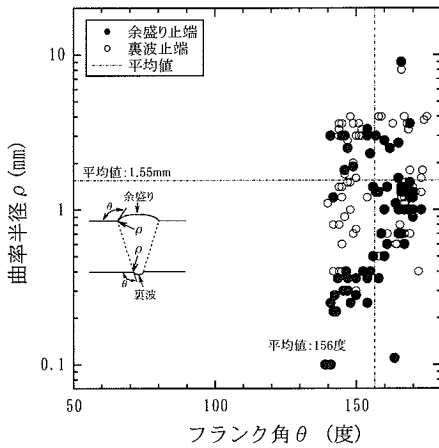
群集ブローホール試験体(BH)では欠陥からの疲労破壊の割合が5種類の欠陥種別のうち最も低く(約17%)、欠陥の疲労強度への感度が低いことを示している。また、試験した範囲内での欠陥寸法ではD等級の設計線を下回る疲労強度はなかった。

b) 板厚の影響

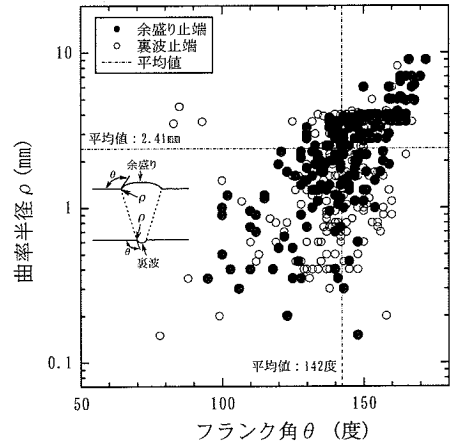
図-6はすべての種類の内在欠陥の試験体において疲労亀裂が溶接止端部表面から発生した結果をまとめたものである。図中の縦軸には、試験応力範囲 $\Delta\sigma$ とその結果としての疲労寿命 N として示されている疲労試験結果を、繰返し数が200万回に対応する応力範囲(疲労強度)に換算して示した。その際、 $(\Delta\sigma)^3 \times N = \text{constant}$ の関係が成立すると仮定した。また、疲労寿命が10万回程度以下のデータについては塑性領域において応力あるいはひずみ繰返される現象、いわゆる低サイクル疲労現象となり、性質が異なるため¹²⁾、ここでは疲労寿命が10万回程度以下のデータ(応力範囲が250MPa以下のデータ)のみを対象とした(試験体数237体のうち200体の結果を対象とする)。図中の結果には内在欠陥の影響は含まれていないと考えることができ、したがって内在欠陥の種別については区別していない。図-6からは、健全な横突合せ継手部の疲労強度に関する板厚の効果を検討することができ、板厚50mmの継手の疲労強度は25mmのそれと比べてかなり低く、75mmの継手については50mmとほぼ同程度となっている。すなわち、継手の疲労強度に明確な板厚の効果が認められる。図中の破線は、同図においてこれらの結果の回帰直線を求めたものであり、



(a) SM490C V形開先 t=25mm

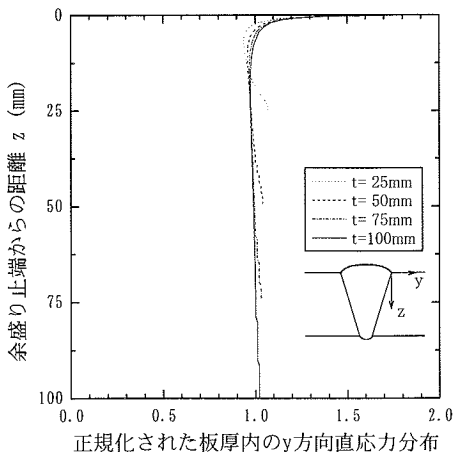


(b) SM570QT V形開先 t=25mm

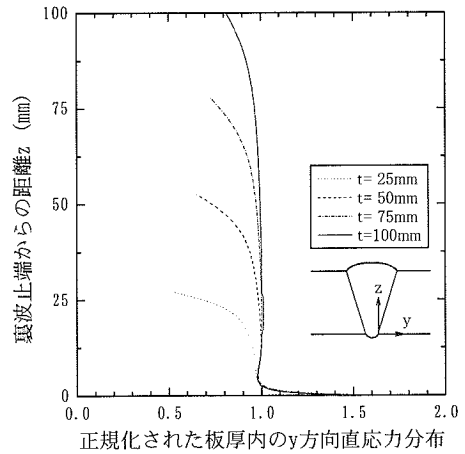


(c) SM490C V形開先 t=50mm

図-7 試験体の溶接止端部の曲率半径とフランク角度の関係



(a) 余盛り止端



(b) 裏波止端

図-8 溶接止端における板厚内応力分布

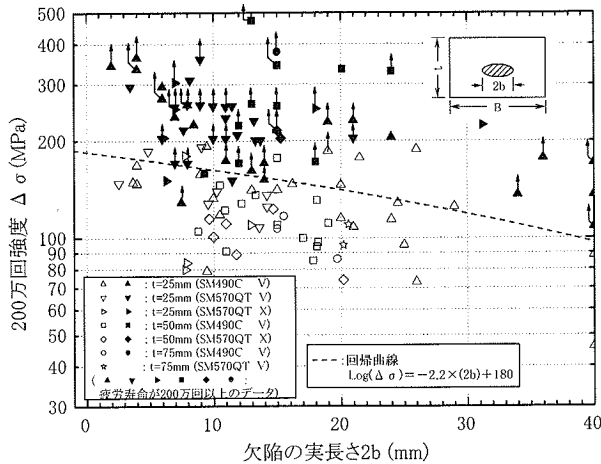


図-9 疲労強度と欠陥の実長さの関係

記号 n の値 ($n = -0.36$) はその回帰直線の傾きである。なお、回帰直線の算出には、未破壊の結果は含めていない。図より、板厚効果として、試験結果のほとんどを満足する式(1)が提案される(非超過確率約 98.6% ($t > 25\text{mm}$))。なお、式(1)は十字溶接継手等の板厚効果を表現する際に用いられる式¹¹⁾と同じである。式(1)を図中に実線で示す。

$$(\Delta\sigma)^m \cdot N = C_0 \cdot C_t, \quad m = 3 \quad (1)$$

$$C_t = \begin{cases} \left(\frac{t}{25}\right)^n, & n = -0.25 \quad (t > 25\text{mm}) \\ 1.0, & (t \leq 25\text{mm}) \end{cases}$$

ここで、 $\Delta\sigma$: 応力範囲, N : 疲労寿命, C_0 : $2 \times 10^6 \cdot \Delta\sigma_f^m$, $\Delta\sigma_f$: 直応力に対する 2×10^6 回基本許容応力範囲, C_t : 板厚の影響を考慮して基本許容応力範囲および打ち切り限界を補正するための係数, m : 疲労設計曲線の傾きを表すための係数, n : 板厚の影響を表すための係数, t : 板厚

図-7 は溶接止端部の形状を印象剤で形取りし、止端の半径とフランク角を計測した結果である。また、この結果から得られる平均的なプロファイルに対して FEM で計算した応力分布を図-8 に示す。各板厚の試験体毎に応力集中の程度に若干の差はあるが、図-5 で認められる疲労強度の差を説明できるほどの差ではない。

この板厚効果に対する詳細な説明は今後の課題ではあるが、この実験結果を基に、鋼道路橋の疲労設計指針⁹⁾の「3.4 板厚の影響」においては、この横

突合せ溶接継手を板厚の影響の補正が必要な継手として分類された。

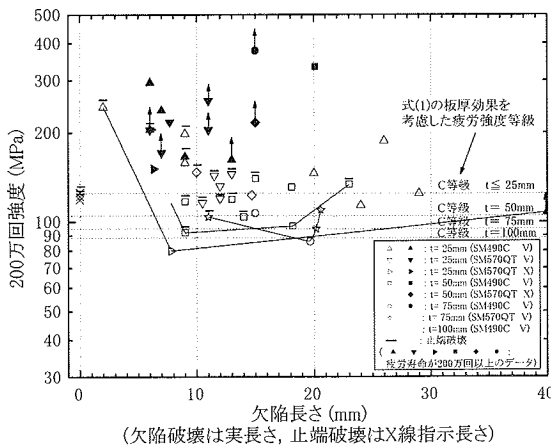
なお、(社)日本鋼構造協会(JSSC)の鋼構造物の疲労設計指針・同解説¹¹⁾(平成 5 年 4 月)では横突合せ溶接継手は板厚の補正が必要な継手には含まれていない。

4. 受け入れ限界欠陥寸法の検討

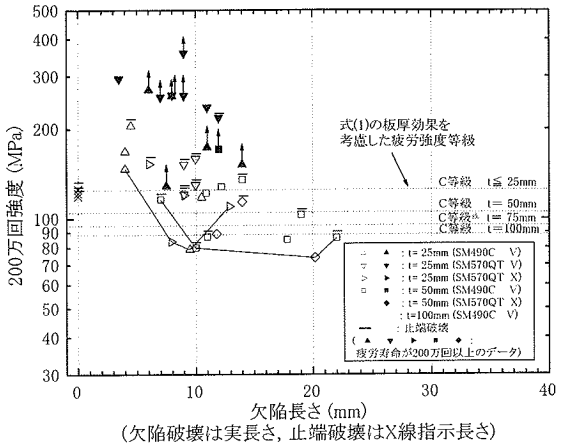
継手の疲労強度の欠陥寸法への依存性を評価する目的で、3. (3) b) 板厚の影響での検討と同様に、疲労寿命が 10 万回程度以下のデータ(応力範囲が 250MPa 以下の試験体 200 体のデータ)のみを対象とし、疲労試験結果を 200 万回疲労強度に換算して検討することとする。その際、 $(\Delta\sigma)^3 \times N = \text{constant}$ の関係が成立すると仮定する。

図-9 は欠陥から発生した疲労亀裂により破断したすべての疲労試験データの換算 200 万回強度を欠陥の実長さとの関係で示した。データは疲労寿命が 200 万回以上の場合と、以下の場合とで区別して示している。図中の破線は、同図においてこれらの結果の回帰直線(データ数 75, 相関係数 約-0.3)を求めたものである。なお、回帰直線の算出には、未破壊の結果は含めていない。図より疲労強度の欠陥寸法への依存性が確認できる。すなわち、欠陥の実長さが大きくなると換算 200 万回強度は低下する傾向にある。また、欠陥寸法が小さいほど 200 万回以上の疲労寿命となる試験体が多い傾向にある。

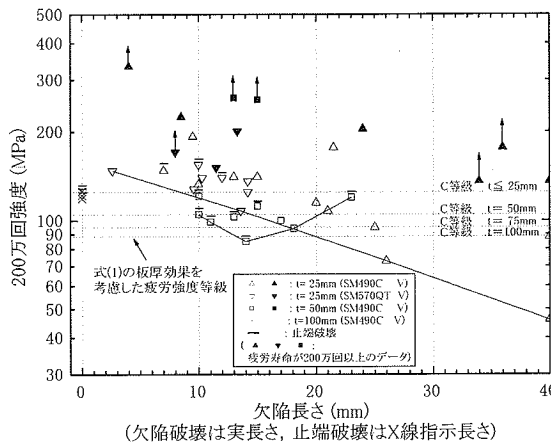
図-10 に実欠陥長さとの換算 200 万回強度との関係を欠陥種別毎に示す。また、止端破壊および未破壊



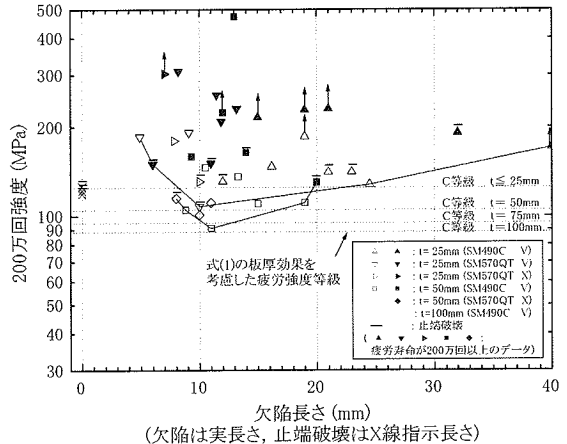
(a) 欠陥種別：割れ (CR)



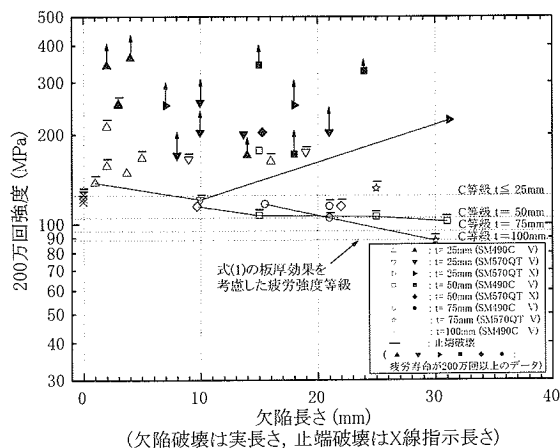
(b) 欠陥種別：融合不良 (LF)



(c) 欠陥種別：不完全溶込み (IP)



(d) 欠陥種別：スラグ巻き込み (SI)



(e) 欠陥種別：群集ブローホール (BH)

図-10 疲労強度と実欠陥寸法の関係

表-6 受け入れ限界欠陥寸法

板厚 欠陥種別	t=25mm		t=50mm		t=75mm	
	欠陥破壊	欠陥または止端破壊	欠陥破壊	欠陥または止端破壊	欠陥破壊	欠陥または止端破壊
割れ(CR)	6.7 (t/3.7)	5.5 (t/4.6)	17.0 (t/2.9)	8.3 (t/6.0)	17.6 (t/4.3)	15.1 (t/5.0)
融合不良(LF)	5.1 (t/4.9)	5.1 (t/4.9)	11.3 (t/4.4)	7.8 (t/6.4)	—	—
不完全溶込み(IP)	8.5 (t/2.9)	8.5 (t/2.9)	16.8 (t/3.0)	≤ 10.0 (t/5.0)	—	—
スラグ巻き込み(SI)	40.0 (t/0.6)	8.2 (t/3.0)	8.8 (t/5.7)	8.8 (t/5.7)	—	—
群集ブローホール(BH)	31.2 (t/0.8)	7.8 (t/3.2)	24.0 (t/2.1)	26.3 (t/1.9)	—	26.1 (t/2.9)

(単位:mm)

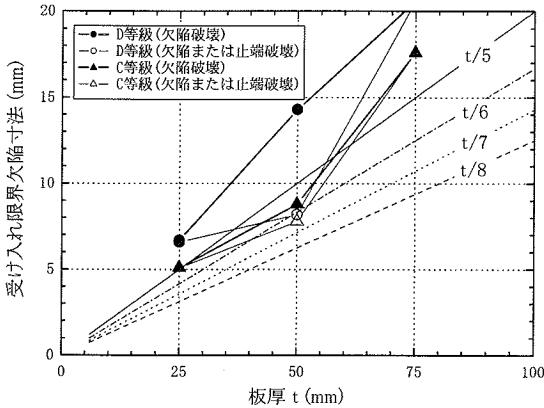


図-11 板厚と受け入れ限界欠陥寸法

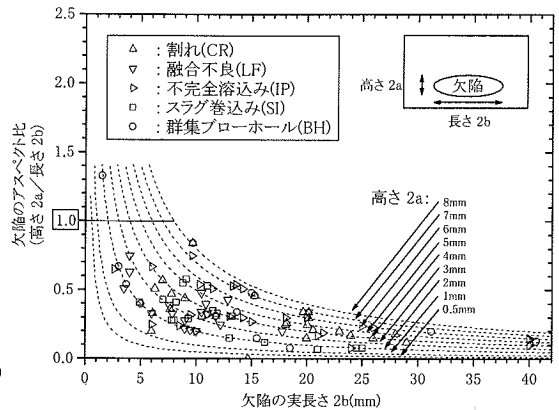


図-12 欠陥のアスペクト比

のデータを参考のため図中に示した。なお、止端破壊したデータの欠陥長さは放射線透過試験による指示長さ (X線指示長さ) として示した。図中の破線は鋼道橋樑の疲労設計指針⁹⁾の疲労等級 (C等級) の200万回強度を示している。図中の実線は欠陥破壊または止端破壊した結果に対する包絡線を板厚毎に参考に示したものである。割れ試験体 (CR)、融合不良試験体 (LF)、不完全溶込み試験体 (IP) およびスラグ巻き込み試験体 (SI) では欠陥寸法が大きくなると疲労強度が低下する傾向が明らかであり、欠陥寸法がある値よりも大きくなるとC等級より疲労強度が低下することが明らかである。これらに比べて、ブローホール試験体 (BH) では、欠陥寸法が大きくなると疲労強度が低下する傾向は同様に認められるが、疲労強度がC等級より低下する欠陥寸法の値は欠陥種別の中で最も大きな値となっている。すなわち、比較的丸みを帯びている欠陥は疲労強度に対しての有害性は低いといえる。

この横方向突合せ溶接継手 (非仕上げ) はD等級に分類されている⁹⁾が、材料や溶接による疲労試験結果のばらつきや試験データが少数であることを考慮すると、D等級の設計曲線に対する欠陥の受け入れ限界寸法として、等級が1つ上のC等級を基準と

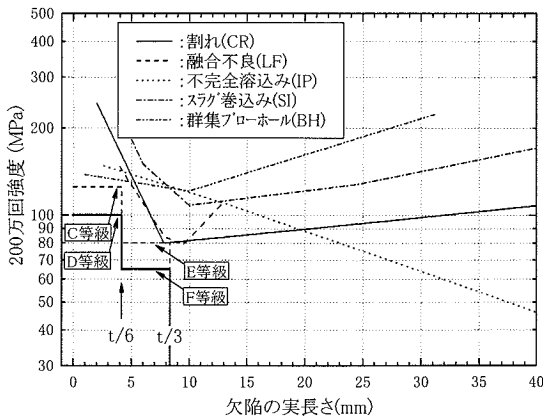
した実験値により定める必要があると考えられる。ここで、受け入れ限界欠陥寸法とは、溶接継手の基準となる疲労強度等級を満足するためにその溶接継手内部に許容される最大の溶接欠陥寸法のことを意味する。

表-6に図-10から求めた受け入れ限界欠陥寸法を示す。ここで、表中の数値は、図-10において板厚毎に対応するC等級 (破線) と包絡線 (実線) の交点に対する欠陥長さを板厚と欠陥種別毎に示したものである。ここでは、鋼材の種類、開先形状の差については考慮していない。表-6より、限界欠陥寸法を板厚の関数と考えれば図-11が得られる。図中には、同様の方法で求めたD等級に対する試験結果を参考として併記した。これより、C等級に対する実験結果に基づく、実際の欠陥長さを基準とした受け入れ限界欠陥寸法として、次式が提案される。

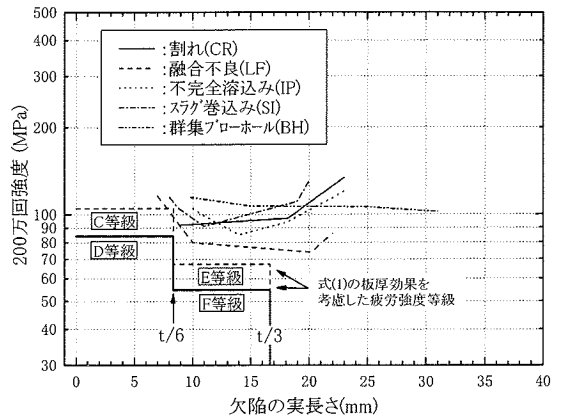
$$t / 6 \text{ mm} \quad (2)$$

ここで、 t : 板厚 (mm)

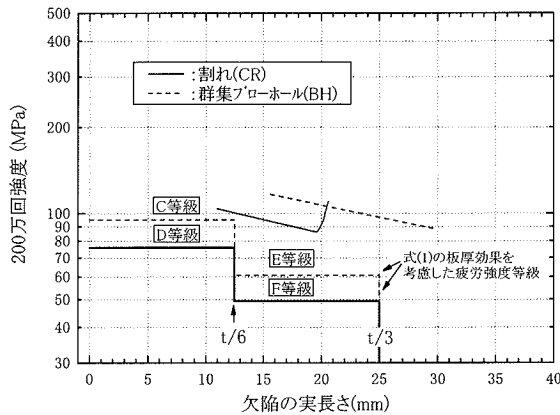
図-12は破面で測定した欠陥の長さとの比 (アスペクト比) である。図中の破線は欠陥の高さ (板厚方向の長さ) が一定の場合のアスペクト比と長さ



(a) 板厚 $t=25\text{mm}$ の場合



(b) 板厚 $t=50\text{mm}$ の場合



(c) 板厚 $t=75\text{mm}$ の場合

図-13 疲労強度と継手内部の要求品質レベル

の関係を示している。アスペクト比のほとんどは 1.0 以下であり、欠陥の高さは長さよりも小さいことが明らかである。本研究における試験体中の各種の欠陥は、それを発生させるプロセスからほぼ実構造物中の欠陥を再現しており、ここでのアスペクト比は実構造物中の欠陥のそれと同等とみなすことができる。したがって、本研究で対象とした CO_2 ガスシールドアーク溶接による多層盛り溶接の場合、欠陥の受け入れ限界寸法については式(2)で示される欠陥の長さのみで規定することで十分といえる。

図-13 に式(2)に示される $t/6\text{mm}$ および式(2)と同様の方法にて定められる $t/3\text{mm}$ の実欠陥長さに対する C 等級と D 等級および E 等級と F 等級の 200 万回強度を示す。図中には図-10 の包絡線（欠陥破壊または止端破壊の包絡線）を板厚毎に整理したものを参考として併記した。図-13 は式(2)およびこれと同様の方法によって定められる $t/3\text{mm}$ の限界欠陥寸

法以下の欠陥寸法であれば、それぞれ D 等級および F 等級を基準とする疲労強度を有する継手であることを示している。なお、図-10 や図-13 の包絡線に示されるように、欠陥の種類によっては、欠陥長さの増加に対して疲労強度が必ずしも単調に低下するとは限らずに極小値をとる場合がある。これは次に示すことが原因と考えられる。本研究で対象とした継手の溶接方法が多層盛り溶接のため、継手の板厚が増加すると欠陥長さも増加する傾向となるが、欠陥の高さ（板厚方向の長さ）はあまり増加しない。このため、図-12 に示されるように欠陥長さが大きくなると欠陥のアスペクト比は小さくなる傾向となっている。すなわち、板厚が増加しても欠陥高さが相対的に増加しない場合には、破壊力学的に欠陥の亀裂進展寿命は相対的に長くなるため、疲労強度は欠陥長さが増加するに従って必ずしも単調に低下せずにある値で極小値をとった後は増加する場合があ

ると考えられる。

5. まとめ

本研究では、内部欠陥が溶接継手の疲労性能に及ぼす影響を解明するために、溶接欠陥を内在させた横突合せ溶接継手試験体の疲労試験を実施した。また、それらの結果を踏まえ、溶接継手内部の要求品質レベルの設定を試みた。

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 内部欠陥を内在した横突合せ溶接継手の疲労強度は、欠陥の寸法や形状や種類に依存し、欠陥寸法が大きくなると低下する傾向がある。
- (2) 多層盛り溶接横突合せ継手の基準となる疲労強度等級 D 等級に対する受け入れ限界欠陥寸法として $t/6\text{mm}$ を提案した。また、同継手の F 等級に対する受け入れ限界欠陥寸法として $t/3\text{mm}$ を提案した。
- (3) 内部欠陥の種類のうち群集ブローホール (BH) などの比較的丸みを帯びた欠陥は疲労強度に対しての有害性は低い。
- (4) 板厚の影響に対する詳細な説明は今後の課題ではあるが、本研究の実験で、横突合せ溶接継手における板厚の影響を確認した。

なお、本研究成果の一部は、鋼道路橋の設計基準等に反映されたことを付記する。

謝辞：本研究は、建設省土木研究所(現在の独立行政法人土木研究所と国土交通省国土技術政策総合研究所)、東京工業大学、日本道路公団、(社)鋼材倶楽部(現(社)日本鉄鋼連盟)、(社)日本橋梁建設協会の共同研究として実施したものであり、貴重な助言を頂きました共同研究参加メンバー各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) Gurney, T.R.: *Fatigue of Welded Structures*, Second Edition, Cambridge University Press, 1979.
- 2) Maddox, S.J.: *Fatigue Strength of Welded Structures*, Second Edition, Abington Publishing, 1991.
- 3) Harrison, J.D.: Basis for a proposed acceptance-standard for weld defects, Part 1: Porosity/ Part 2: Slag inclusions, *Metal Construction and British Welding Journal*, pp.99-107, Vol.4, No.3, March 1972/pp.262-268, Vol.4, No.7, July 1972.
- 4) Ishii, Y. and Iida, K.: Low and intermediate cycle fatigue strength of butt welds containing weld defects, *Journal of NDI*, Vol. 18, No. 10, pp. 443-476, 1969.
- 5) A. Galtier, and P. Rabbe: The Significance of Defects to Fatigue Behavior, *International Conference on Performance of Dynamically Loaded Structures*, WRC and IIW, San Francisco, pp. 194-197, 1997.
- 6) International Institute of Welding: Draft of IIW Recommendation, *Application of an Engineering Critical Assessment in Design, Fabrication and Inspection to Assess the Fitness for Purpose of Welded Structures*, SST-1141-89, 1989.
- 7) 水口和之, 村山陽: 現場溶接の管理, (財) 高速道路技術センター, ハイウェイ技術, No.12, pp. 80-87, 1998. 12.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002.3.
- 9) (社)日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3.
- 10) Miki, C., Fahimuddin, F. and Anami, K.: Fatigue performance of butt welded joints containing various embedded defects, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, Vol.18, No. 1, 13s-25s, 2001. 1.
- 11) (社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.
- 12) 西村俊夫, 三木千寿: 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性, 土木学会論文集, 第279号, pp.29-44, 1978.11.

(2003. 1. 29受付)

INFLUENCE OF EMBEDDED DEFECTS ON FATIGUE PERFORMANCE OF BUTT-WELDED JOINTS AND A TRIAL OF DEMAND QUALITY LEVELS

Chitoshi MIKI, Kazuhiro NISHIKAWA, Minoru TAKAHASHI, Fumitaka MACHIDA and Kengo ANAMI

As recent tendency of steel highway bridge construction, 2 or 3 main girder bridges have been constructed. Flange plates of those bridges are welded as butt-welded joints at site. Fatigue resistance of those joints are considered sensitive to inside weld defects. It is important to clarify the weld quality requirements for evaluating NDT results. Fatigue tests of butt-welded joints with various sizes/types of intentionally embedded defects were carried out in order to clarify their influence on fatigue resistance. Based on the results, allowable defect size for butt-welded joints were proposed.