

## 技術報告

各種構造用鋼板の疲れき裂伝ば特性と  $\Delta K_{th}$ 金尾 正雄\*・佐々木悦男\*・太田 昭彦\*・小菅 通雄\*<sup>2</sup>Fatigue Crack Propagation Properties and  $\Delta K_{th}$  for Several Structural Steel Plates

Masao KANAOKA, Etsuo SASAKI, Akihiko OHTA, and Michio KOSUGE

## Synopsis:

The fatigue crack propagation properties and  $\Delta K_{th}$  of three kind of ferrite-pearlite steels (SS41, SM41, and SM50A) and five kind of martensitic steels (SM58Q, 5.5%Ni, A553A, HT80, and SCM435) have been investigated at varying stress ratios ( $-1 \sim 0.8$ ) by using an automatic method of continuously decreasing stress intensity factor with crack propagation. The correlation between mechanical properties and fatigue crack propagation properties is not clear. The scattering of fatigue crack propagation properties and  $\Delta K_{th}$  of these steels is within the factor of two. This scattering is smaller than the distribution induced by the different stress ratios.

## 1. はじめに

構造物はその使用の初期からき裂状の欠陥を含むことがある。このような欠陥を含む構造物に繰り返し荷重が加わると、欠陥の端から発生した疲れき裂が伝ばし、構造物の破壊が引き起こされる場合がある。このため、疲れき裂の伝ば挙動を調べる研究が多数行われ、疲れき裂伝ば速度、 $da/dn$  は応力拡大係数の範囲、 $\Delta K$  のべき関数として表示されることが一般に認められるようになった<sup>1)~6)</sup>。一方、実際に構造物が使用される状況では、橋梁等における自重、圧力容器における平均内圧、組み立て加工時に生ずる残留応力等の何らかの静的応力の上に交番応力が重畳している。従つて、両者の割合が  $da/dn$  と  $\Delta K$  の関係にどのような影響を与えるかを調べる必要がある。一般にこの割合を示すものとして応力比、 $R$  (最小応力と最大応力の比) が使われ、 $R$  によつて  $da/dn$  と  $\Delta K$  の関係が変化することが明らかにされている<sup>6)~10)</sup>。また、 $\Delta K$  が小さい領域では  $\Delta K$  の減少につれて  $da/dn$  が急激に減じ、工学的見地からはき裂が伝ばしないと見なせるような速度に達する<sup>3)~6)~10)</sup>。このような限界の  $\Delta K$  を疲れき裂伝ばに対する応力拡大係数範囲の下限界値、 $\Delta K_{th}$  と称し、この値を求めることも重要である。 $\Delta K_{th}$  を含めた疲れき裂伝ば特性や応力比効果が明らかになると、欠陥を含む構造物の寿命を予測することができ、定期検査を行つてき裂の監視を行うような重要な構造物でき裂が発見された場合に、その構造

物を次の定期検査まで引続き使用できるか否かの判断が可能となる。そこで、似通つた試験条件で種々の鋼の疲れき裂伝ば特性を非較的の高い伝ば速度領域について調べた研究<sup>11)12)</sup>が行われたり、切り欠き材の疲労限と  $\Delta K_{th}$  の関連を検討した研究<sup>13)</sup>がある。また、試験条件がまちまちな文献データを集積し、鋼の疲れき裂伝ば特性を把握しようとする試みも認められる<sup>4)~6)</sup>。しかし、同一の試験条件を用い、高伝ば速度領域から  $\Delta K_{th}$  に至る低伝ば速度領域に至る広範囲の疲れき裂伝ば特性を多数の鋼種について応力比効果を含めて系統的に調べた研究は少ない<sup>6)</sup>。著者等は既にいくつかの鋼種について疲れき裂伝ば特性を調べ報告した<sup>10)</sup>が、材料の強さレベル、組織の影響、応力比効果などの因子の影響等を明確にするには到らなかつた。

本報では、引き続き工業的に多用されているいくつかの主要な構造用鋼の疲れき裂伝ば特性を応力比効果を含めて明らかにするとともに、既報の結果<sup>10)</sup>も一部取り入れて、自動測定法<sup>9)</sup>による同一試験条件で求めた引張強さ、 $\sigma_B$  が 441~1010 N/mm<sup>2</sup> にわたる広範な強度水準の各種構造用鋼の疲れき裂伝ば特性に対する応力因子や強度水準、組織などの材料因子について検討した。

## 2. 供試材及び試験方法

本研究において取り上げた鋼種、供試材の履歴、化学成分及び機械的性質を Table 1 及び Table 2 に示す。SS 41, SM 41, SM 50 A はフェライトパーライト組織

昭和 56 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 6 月 29 日受付 (Received June 29, 1982)

\* 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-2 Nakameguro Meguro-ku 153)

\*2 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

を有する鋼であり、他はすべて高温焼もどしマルテンサイト組織または同組織を主体とする鋼である。

疲れ試験片は Fig. 1 に示す板幅 200 mm の中央き裂試験片である。±400 kN のサーボ油圧式の疲れ試験機を用い、軸荷重制御の疲れ試験を室温大気中にて行つた。R は -1 から 0.8 の範囲である。き裂長さの測定は、うず電流き裂探傷法を利用したき裂自動追尾装置<sup>9)</sup>によつて行つた。なお、中央切欠孔付近ではき裂自動追尾装置が正常に動作しないので、孔縁からおよそ 10 mm 程度疲れき裂が進展したのち測定を開始した。き裂伝ば試験は荷重を連続的に減じ、 $d(\Delta K)/da = \text{Const.}$  となるように行い、 $da/dn$  が  $2 \times 10^{-8}$  mm/回以下に到達した時に試験を中断または終了させ、この時の値を  $\Delta K_{th}$  とし

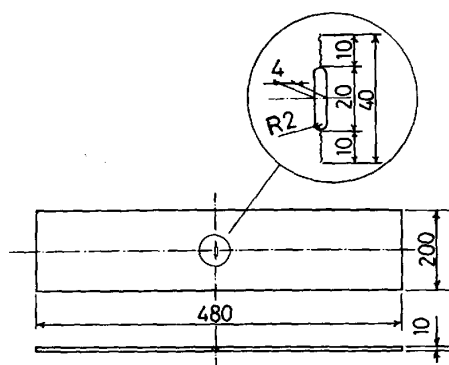


Fig. 1. Shape of specimen.

Table 1. Processing details and thermal history of materials.

Material	Melting furnace capacity (MN)	Heat treatment
SS41	1.8	As hot rolled
SM41	2.4	As hot rolled
SM50A	2.3	As hot rolled
SM58Q	1.0	900°C W. Q., 650°C T. and A. C.
5.5%Ni	0.6	825°C and 675°C W. Q., 575°C T. and A. C.
A553A	0.6	800°C W. Q., 575°C T. and A. C.
HT80	1.0	880°C W. Q., 570°C T. and A. C.
SCM435	0.25	870°C O. Q., 500°C T. and O. C.

W. Q.: Water quenched, T.: Tempered, A. C.: Air cooled, O. Q.: Oil quenched, O. C.: Oil cooled.

Table 2. Chemical composition and mechanical properties of materials.

Material	Chemical composition (wt%)										Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SS41	0.20	0.05	0.72	0.015	0.017	—	—	—	—	—	275	441	30
SM41	0.21	0.06	0.79	0.020	0.014	—	—	—	—	—	294	461	28
SM50A	0.17	0.27	1.42	0.016	0.016	—	—	—	—	—	373	569	27
SM58Q	0.14	0.32	1.30	0.022	0.006	0.024	0.02	0.023	0.38	—	588	667	27
5.5%Ni	0.06	0.19	0.93	0.006	0.005	5.75	0.50	0.16	—	—	608	755	37
A553	0.067	0.22	0.60	0.004	0.005	9.05	—	—	—	—	726	775	25
HT80	0.13	0.19	0.94	0.014	0.007	0.025	0.46	0.14	0.027	0.51	794	824	25
SCM435	0.35	0.25	0.75	0.015	0.009	0.07	1.04	0.23	—	0.03	834	1010	7.6

た。R が 0 の条件の場合にのみ、 $\Delta K_{th}$  が得られたのち、荷重振幅等を段階的に増加させ、き裂長さの測定を顕微鏡によつて行う方式<sup>14)</sup>とした。 $\Delta K$  の大きな領域ではき裂先端に生ずる塑性変形等による磁わい効果でき裂自動追尾装置が使用できなくなるからである。なお、段階的に荷重振幅等を増加させる試験は、 $\Delta K$  が約 25 MN/m<sup>3/2</sup> 以上で行つた。また、この場合荷重が大きくなり、実断面応力が降伏応力、 $\sigma_y$  を超えるか、またはき裂全長が板幅の 0.7 倍以上となつた条件でのデータは採用しなかつた。

$\Delta K$  の算出は次式<sup>15)</sup>によつた。なお、き裂長さ、 $a$ 、及び荷重範囲、 $\Delta P$ 、はき裂増分  $\Delta a$  の中点に対応する値を代入した。

$$\Delta K = \frac{\Delta P \sqrt{a}}{BW} \left\{ 1.77 + 0.227 \left( \frac{2a}{W} \right) - 0.51 \left( \frac{2a}{W} \right)^2 + 2.7 \left( \frac{2a}{W} \right)^3 \right\} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、B は板厚、W は板幅である。

### 3. 試験結果及び考察

試験結果を  $da/dn$  と  $\Delta K$  の関係として Fig. 2~5 に示す。なお、SM50A, SM58Q, A553A, HT80 の各鋼については既報<sup>10)</sup>を参照されたい。これらの図に見られるように、 $\Delta K$  の減少に伴つて  $da/dn$  が急激に減じ、 $\Delta K_{th}$  が出現している。また、応力比の増加に伴つて  $\Delta K_{th}$  が減じ、同一  $\Delta K$  に対する  $da/dn$  が増加している。Fig. 6 は 8 鋼種について応力比と  $\Delta K_{th}$  の関係を示したもので、図中の直線は

$$\Delta K_{th,R} = (1-R)^{\gamma} \Delta K_{th,0} \dots \dots \dots (2)$$

として求めた各鋼に対する回帰直線である。なお、(2) 式で、 $\Delta K_{th,R}$  は応力比 R での疲れき裂伝ばに対する  $\Delta K$  の下限界値、 $\gamma$  は応力比効果を表すパラメータ、 $\Delta K_{th,0}$  は回帰直線と  $R=0$  の交点として得られる値である。半黒印はフェライトパーライト鋼、白印は  $\sigma_B$  が 650~750 N/mm<sup>2</sup> の、黒印は  $\sigma_B$  が 750 N/mm<sup>2</sup> 以上の焼もどしマルテンサイト鋼のデータであり、太線はフェライ

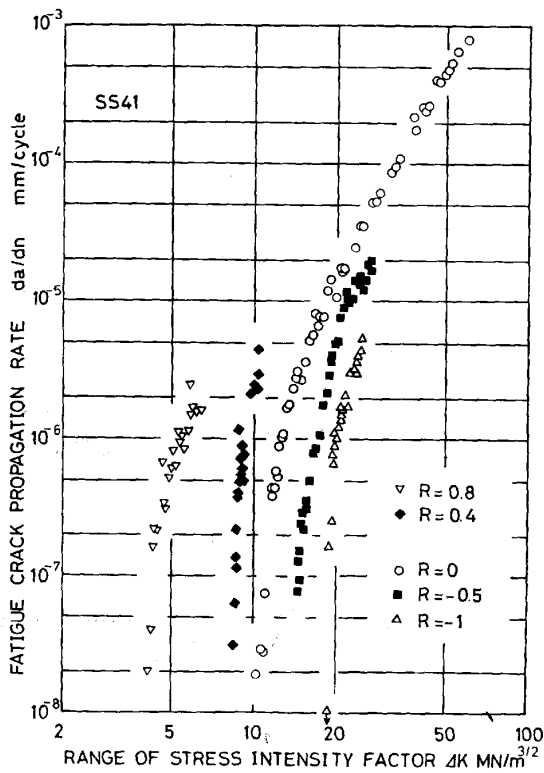


Fig. 2. Fatigue crack propagation properties of SS41 steel.

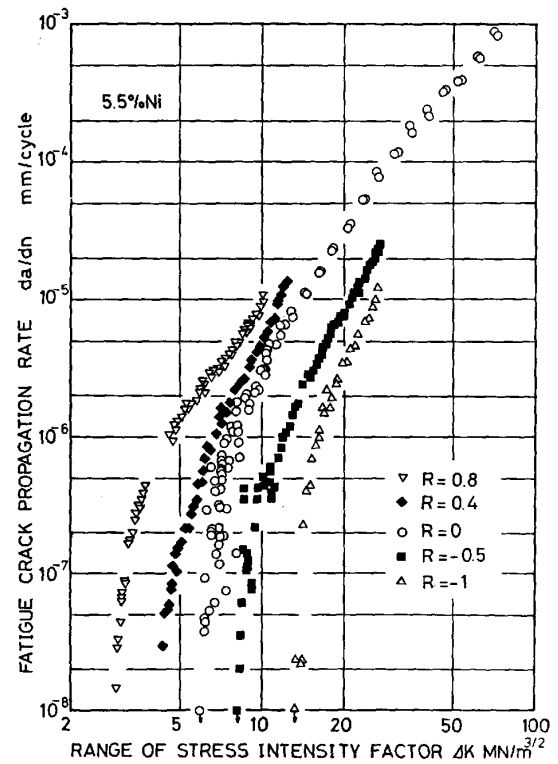


Fig. 4. Fatigue crack propagation properties of 5.5%Ni steel.

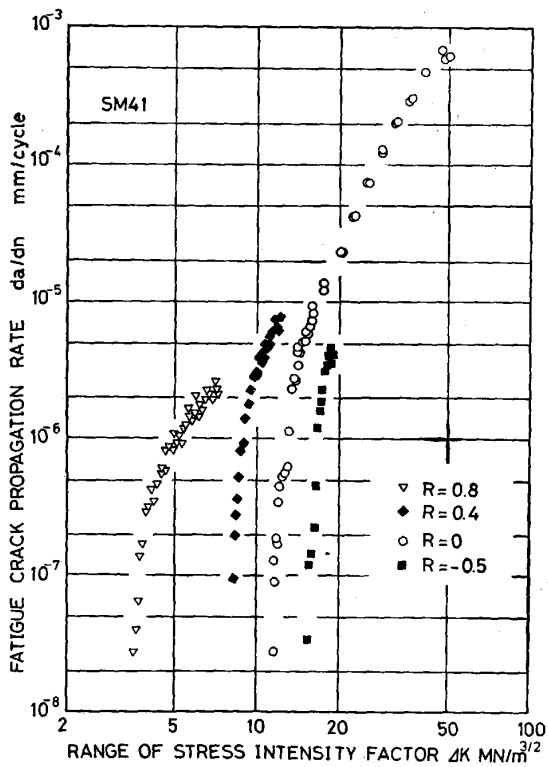


Fig. 3. Fatigue crack propagation properties of SM41 steel.

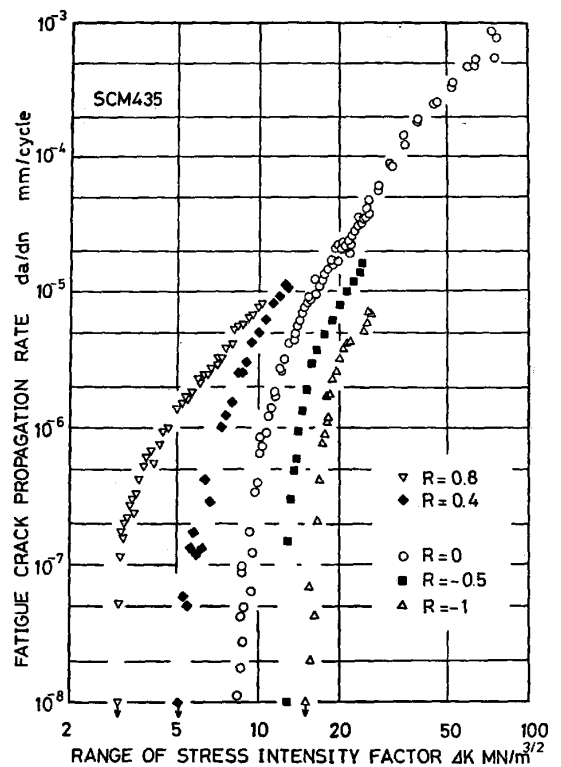


Fig. 5. Fatigue crack propagation properties of SCM435 steel.

Table 3. Fatigue threshold values at various stress ratios.

Material	$\Delta K_{th}$								$\gamma$	$\Delta K_{th,0}$
	$R=0.8$	$R=0.64$	$R=0.6$	$R=0.4$	$R=0.2$	$R=0$	$R=-0.5$	$R=-1$		
SS41	4.1			7.3		10.3	14.1	19.1	0.65	11.0
SM41	3.5			8.0		11.1	15.2		0.72	11.3
SM50A	3.6			6.0		10.9	15.0	19.6	0.74	10.9
SM58Q	2.6	3.0		4.6	6.9	7.9	10.2	11.2	0.71	7.5
5.5%Ni	2.8			4.3		6.0	8.2	13.4	0.63	6.9
A553A	2.6			4.1		6.9	8.8	9.8	0.61	6.5
HT80	2.7		3.9	5.3		7.6	10.9	13.5	0.61	8.2
SCM435	3.0			5.0		8.4	12.7	15.3	0.73	8.8

$\Delta K_{th,R} = (1-R)^{-\gamma} \Delta K_{th,0}$ ,  $R$ : Stress ratio,  
 $\gamma$ : Material constant which characterizes the effect of stress ratio,  
 $\Delta K_{th,R}$ : Fatigue threshold at stress ratio of  $R$ ,  
 $\Delta K_{th,0}$ : Fatigue threshold at stress ratio of 0

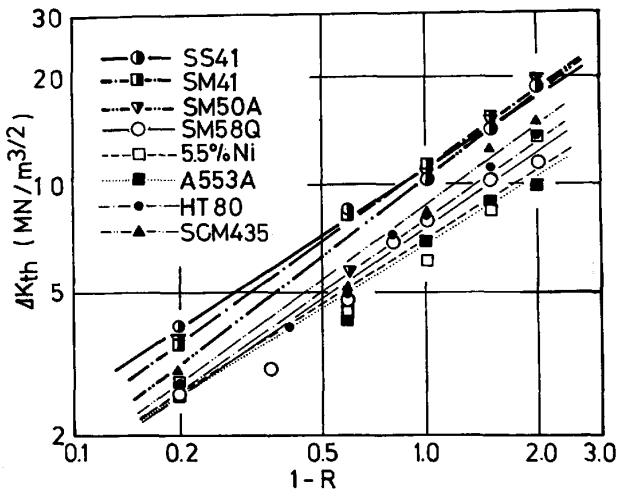


Fig. 6. Relationships between  $\Delta K_{th}$  and  $(1-R)$ .

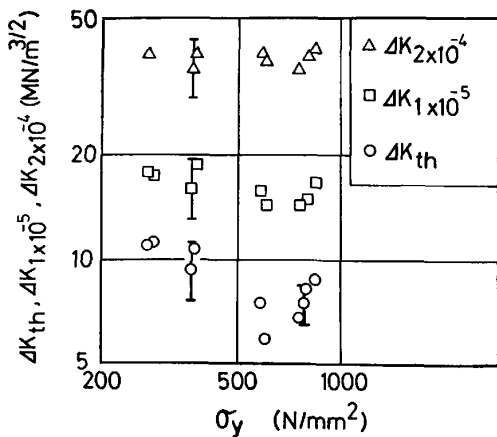


Fig. 7. Effect of yield strength on  $\Delta K$  which corresponds to the same  $da/dn$  value.

トパーライト鋼に対する回帰直線，細線は焼もどしマルテンサイト鋼に対する回帰直線である。いずれの鋼も，応力比が高いほど  $\Delta K_{th}$  が減ずる傾向を示している。この傾向はオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 で観察された傾向<sup>10)</sup>，すなわち  $\Delta K_{th}$  は応力比にかかわらずほぼ一定値を示す傾向とは異なっている。Fig. 6 ではフェライトパーライト鋼の  $\Delta K_{th}$  が比較的高い値を示し，焼もどしマルテンサイト鋼は低い側にばらついている。な

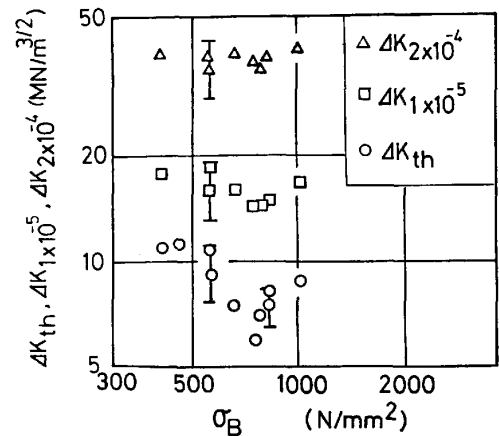


Fig. 8. Effect of tensile strength on  $\Delta K$  which corresponds to the same  $da/dn$  value.

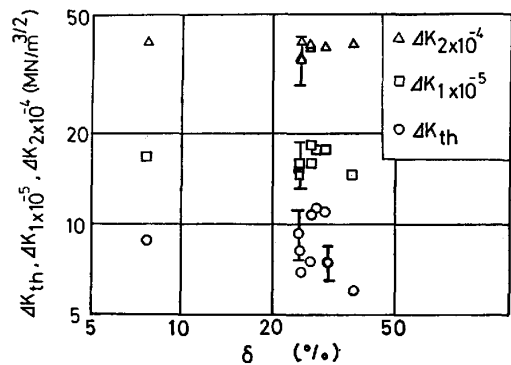


Fig. 9. Effect of elongation on  $\Delta K$  which corresponds to the same  $da/dn$  value.

お， $\Delta K_{th}$  の実測値と(2)式のパラメータ  $\gamma$ ， $\Delta K_{th,0}$  を Table 3 に示した。 $\gamma$  と金属組織，機械的性質の間には何等の相関も認められない。

次に機械的性質と疲れき裂伝ば特性の関係を検討した。Fig. 7~9 に  $R=0$  において同一  $da/dn$  を与える  $\Delta K$  すなわち  $\Delta K_{th}$ ， $da/dn$  が  $1 \times 10^{-5}$  mm/回， $2 \times 10^{-4}$  mm/回の時の  $\Delta K$  と  $\sigma_y$ ， $\sigma_B$ ，伸びとの関係を示した。 $da/dn$  が速くなるほどこれに対応する  $\Delta K$  の  $\sigma_y$ ， $\sigma_B$ ，伸びによる変化は少なくなる傾向にある。なお，縦線で範囲を示したものは，本実験に用いた材料ではない

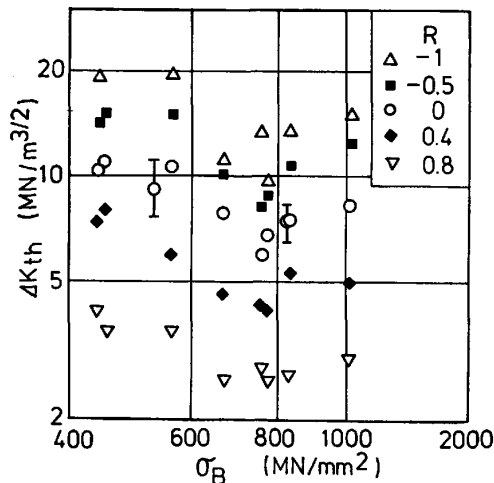


Fig. 10. Effect of tensile strength on  $\Delta K_{th}$  for various stress ratios.

が同一チャージの供試材から製作した 3~5 本の試験片を用いて得られた SM50B<sup>16)</sup>及び HT80<sup>17)</sup>鋼のデータのばらつきを示している。これから、鋼種による  $\Delta K_{th}$  の相違と比較して同一チャージ内でのばらつきがかなり大きなことが分かる。

種々の応力比における  $\sigma_B$  と  $\Delta K_{th}$  の関係を Fig. 10 に示す。Vosikovsky<sup>6)</sup> が種々の研究者のデータを収集し、かなりばらつきの多いプロットをもとに指摘したように、 $\sigma_B$  の増加につれて  $\Delta K_{th}$  が減ずるといふ大まかな傾向を見出せないわけではない。また、同様に収集データをもとに田中<sup>5)</sup>が指摘したように 800 N/mm<sup>2</sup> 程度を境にして引張強さ依存性が逆転するとしても良いようである。しかし、縦棒で示した同一チャージ内でのデータのばらつきを考えると、 $\sigma_B$  が 600 N/mm<sup>2</sup> 以下(フェライトパーライト鋼)と  $\sigma_B$  が 600~1010 N/mm<sup>2</sup> (焼もどしマルテンサイト鋼)のそれぞれの領域内では引張強さ依存性がないと見なすのが妥当なようである。いずれにしても、Fig. 8 および Fig. 10 から分かるように  $\sigma_B$  が 441 N/mm<sup>2</sup> から 1010 N/mm<sup>2</sup> の範囲にあるフェライトパーライト鋼及び焼もどしマルテンサイト鋼については、 $\sigma_B$  や組織の違いによる  $\Delta K_{th}$  の変化と  $R$  の違いによる  $\Delta K_{th}$  の変化を比べると後者の影響が大きい。

Fig. 11 は、 $R$  が 0 の場合の疲れき裂伝ば特性を試験した 8 鋼種についてまとめてプロットした図である。既述のように  $da/dn$  の速い領域での鋼種による疲れき裂伝ば特性の違いは明瞭には現れていない。また、 $\Delta K_{th}$  近傍でも鋼種の違いが応力拡大係数でただか 2 倍程度の差しか生じておらず、 $R$  の異なる場合の 8 鋼種に対する平均として描いた曲線との差が顕著である。なお、Fig. 11 に示した実線は、本報とは異なるチャージの SM

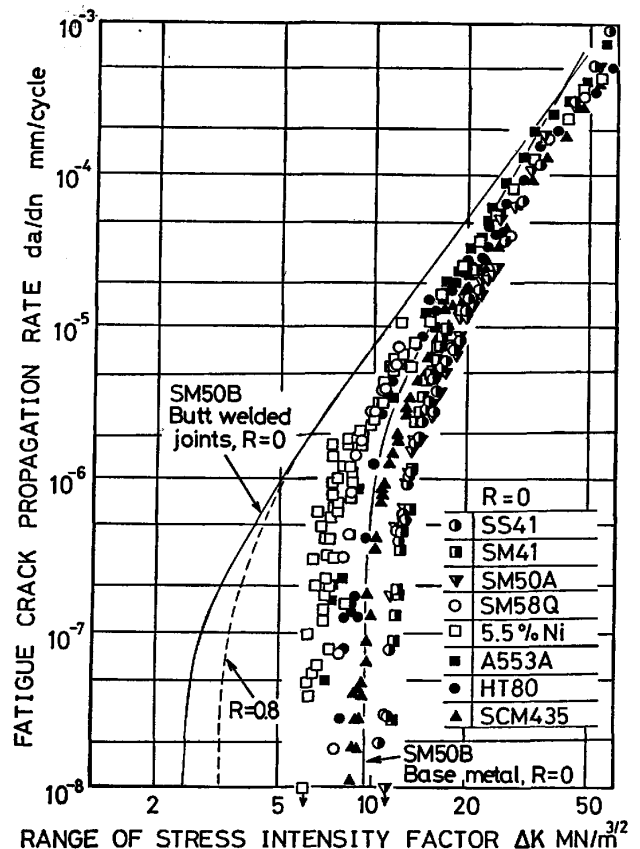


Fig. 11. Fatigue crack propagation properties of various structural steels at  $R=0$ .

50B 鋼について本報と同様の試験条件で  $R=0$  について求めた突き合わせ溶接継手及び母材の疲れき裂伝ば特性<sup>16)</sup>である。突き合わせ溶接継手の  $\Delta K_{th}$  近傍の疲れき裂伝ば特性が母材のそれに比し著しく劣化している。劣化の原因は試験片中央部に存在する引張残留応力に基づく応力比効果であることが示されており<sup>14)</sup>、鋼種による疲れき裂伝ば特性の差異に比して溶接施工により残留応力が導入されたことによる変化の方が顕著であつた。

#### 4. ま と め

工業的に多用されている 8 種のフェライトパーライト鋼及び焼もどしマルテンサイト鋼厚板の疲れき裂伝ば特性をうず電流探傷法を利用したき裂自動追尾装置を備えた  $K$  値制御疲れ試験機により、応力比が -1 から 0.8 の範囲の数種のレベルで求めるとともに応力及び材料因子の効果について検討して次の結論を得た。

1) いずれの応力比の場合においても、 $\Delta K_{th}$  が存在し、応力比の増加に伴い  $\Delta K_{th}$  が減ずる傾向を示し、

$$\Delta K_{th,R} = (1-R)^{\gamma} \Delta K_{th,0}$$

で表示される。 $\gamma$  は 0.6 から 0.8 の範囲にあるが材料の強度水準、組織との相関は認められない。

2) 降伏応力が  $275 \text{ N/mm}^2$  から  $834 \text{ N/mm}^2$ , 引張強さが  $441 \text{ N/mm}^2$  から  $1010 \text{ N/mm}^2$ , 伸びが  $7.5\%$  から  $37\%$  の範囲では, 機械的性質の違いによる  $\Delta K_{th}$  の変化は  $R$  の違いによる  $\Delta K_{th}$  の変化に比べ小さく, 同一  $R$  での  $\Delta K_{th}$  は機械的性質が変わっても 2 倍の範囲に含まれる. なお,  $da/dn$  が速くなるほど同一の  $R$ , 同一の  $da/dn$  を与える  $\Delta K$  は狭い範囲に集中する傾向を示す.

3)  $da/dn$  が速い領域では金属組織が異なっても疲れき裂伝ば特性に明瞭な差異は認められない. また,  $\Delta K_{th}$  については, フェライトパーライト鋼が焼もどしマルテンサイト鋼よりいくぶん大き目の値を示す傾向にある.

4) 試験した範囲内で, 疲れき裂伝ば特性と  $\Delta K_{th}$  を変化させる最大の要因は応力比であり, これに比べ機械的性質や金属組織の寄与は少ない.

#### 文 献

- 1) P. PARIS and F. ERDOGAN: Trans. ASME Ser. D, 85 (1963), p. 528
- 2) 中沢 一, 小林英男: 日本機械学会誌, 75 (1972), p. 118
- 3) 北川英夫: 材料, 76 (1977), p. 432, p. 590
- 4) 小林英男: 日本機械学会誌, 80 (1977), p. 492
- 5) 田中紘一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 245
- 6) O. VOŠIKOVSKÝ: Engng. Fracture Mech., 11 (1979), p. 595
- 7) R. G. FORMAN, V. E. KEARNEY, and R. M. ENGLE: Trans. ASME Ser. D, 89 (1967), p. 464
- 8) M. KLESNIL and P. LUKÁŠ: Met. Sci. Engng, 9 (1972), p. 231
- 9) 太田昭彦, 佐々木悦男, 小菅通雄: 日本機械学会論文集, 43 (1977), p. 3179
- 10) E. SASAKI, A. OHTA, and M. KOSUGE: Trans. NRIM, 19 (1977), p. 111
- 11) 西岡邦夫, 平川賢爾, 北浦幾嗣: 住友金属, 28 (1976), p. 38
- 12) 浦島親行, 西田新一, 榎本弘毅: 日本材料学会疲労部門委員会材料の疲労き裂進展抵抗に関する資料調査分科会資料 FCR-9-5 (1981), p. 1
- 13) 北川英夫, 西谷弘信, 松本年男: 日本機械学会論文集, 42 (1973), p. 996
- 14) 太田昭彦, 佐々木悦男, 鎌倉将英, 二瓶正俊, 小菅通雄, 金尾正雄, 稲垣道夫: 溶接学会誌, 50 (1981), p. 161
- 15) W. F. BROWN and J. E. SRAWLY: ASTM STP 410 (1967), p. 1
- 16) NRIM Fatigue Data Sheet No. 21 (1981), p. 1
- 17) NRIM Fatigue Data Sheet No. 31 (1982), p. 1