

突合せ熔接継手の欠陥と疲れ強さ

A Study on the Influence of Defects in the Butt Welded Joint on the Fatigue Strength

大内田 久* 西岡 章 夫*
Hisashi Ōuchida Akio Nishioka

内 容 梗 概

熔接条件、熔接姿勢、熔接環境、熔接士の級および熔接施工場所を種々かえて作製された突合せ継手試験片を、X線検査により JIS の欠陥等級に分類し、両振平面曲げの疲れ試験を行った。試験結果から、欠陥等級と疲れ強さの関係が明らかになり、疲れ強さに対しては、熔接の級を3つにわけ、欠陥等級2級で10%、3、4級で20%、強さが低下するものとして基準強さを選ぶことを提案した。また熔接開先、熔接場所、熔接姿勢、熔接士の級別が欠陥の発生に及ぼす影響も統計的手順により求めた。

1. 緒 言

最近機械構造物の軽量化と原価低減のため、熔接が各方面へますます多く用いられるようになってきている。熔接技術の進歩した今日においても、なお熔接部に多少とも欠陥が生じ、進歩したX線そのほかの非破壊探傷技術によって検出され、強さの上から問題となることがある。従来熔接欠陥と疲れ強さに関しては二、三の研究があるが^{(1)~(3)}、欠陥のX線等級と疲れ強さについてしらべたものは、最近発表された日本造船研究協会の研究⁽⁴⁾以外にはほとんど見受けられない。この研究は突合せ継手について、7箇所の熔接施工場所を選らび、熔接環境、熔接姿勢および熔接士の技両を種々かえて試験片を作製し、これらを集めて筆者らのところでX線検査を行い、JISの欠陥等級に分類し、各分類について平面曲げ疲れ試験を行ったものである。この研究によって従来不明であった各種熔接条件と疲れ強さ、欠陥等級との関係が明らかとなり、熔接設計にとり入れるべき、欠陥による疲れ強さの低減係数が求められることになった。

2. 実験の方法

2.1 供 試 材 料

実験に供した母材は、板厚 9 mm の SS-41 材で、その化学成分および機械的性質を第1表に示す。試験片は日立製作所の A、B、C、D、E、F、G の各施工場所で作製されたので、各施工場所の

用いた母材間で多少の諸性質の相異があるのは免れない。この研究はなるべく実状に即した実験結果をうることを目的としたため、母材や次に述べる熔接条件もあまり細かいところまでは規定しない方針をとった。

2.2 熔 接 試 験 片

各施工場所において 180×350×9 mm の熔接試験片が第2表に示すような、各種熔接姿勢、熔接場所、熔接条件のもとに作成された。ここで熔接場所の項で工場と現地の相違は、前者は屋内で作業環境が良好で管理も行きとどき、正規の作業ができる状態、一方現地熔接は原則として屋外作業とし、作業空間が狭く、熔接棒の乾燥も不十分で、風などもある管理が行きとががぬ状態であって、各施工場所の実情に即して熔接が行われた。

第1表 供 試 材 の 諸 性 質

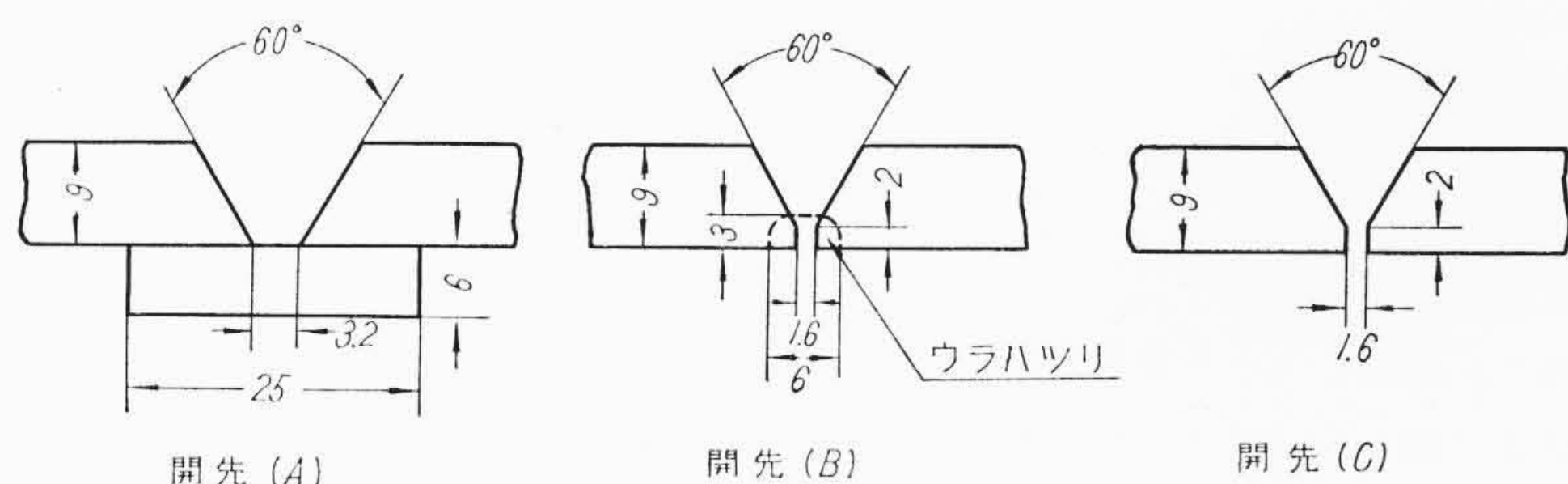
施 工 場所名	化 学 成 分 (%)					機 械 的 性 質			
	TC	Si	Mn	P	S	σ_S	σ_B	ϵ	φ
A	0.11	0.06	0.61	0.023	0.013	28.5	43.7	31.9	62.1
B	0.12	0.06	0.65	0.021	0.007	29.0	45.5	28.1	56.5
C	0.13	0.03	0.45	0.010	0.019	28.8	42.7	32.5	56.6
D	0.21	0.02	0.51	0.010	0.019	29.8	45.9	29.7	59.4
E	0.18	0.09	0.58	0.027	0.017	29.8	48.3	27.8	46.0
F	0.19	0.01	0.45	0.010	0.022	29.6	42.8	31.9	53.9
G	0.15	0.09	0.65	0.016	0.008	29.5	44.4	33.7	57.1

(注) σ_S : 降伏点(kg/mm²), σ_B : 引張強さ (kg/mm²), ϵ : 伸び率(%), φ : 絞り率 (%)

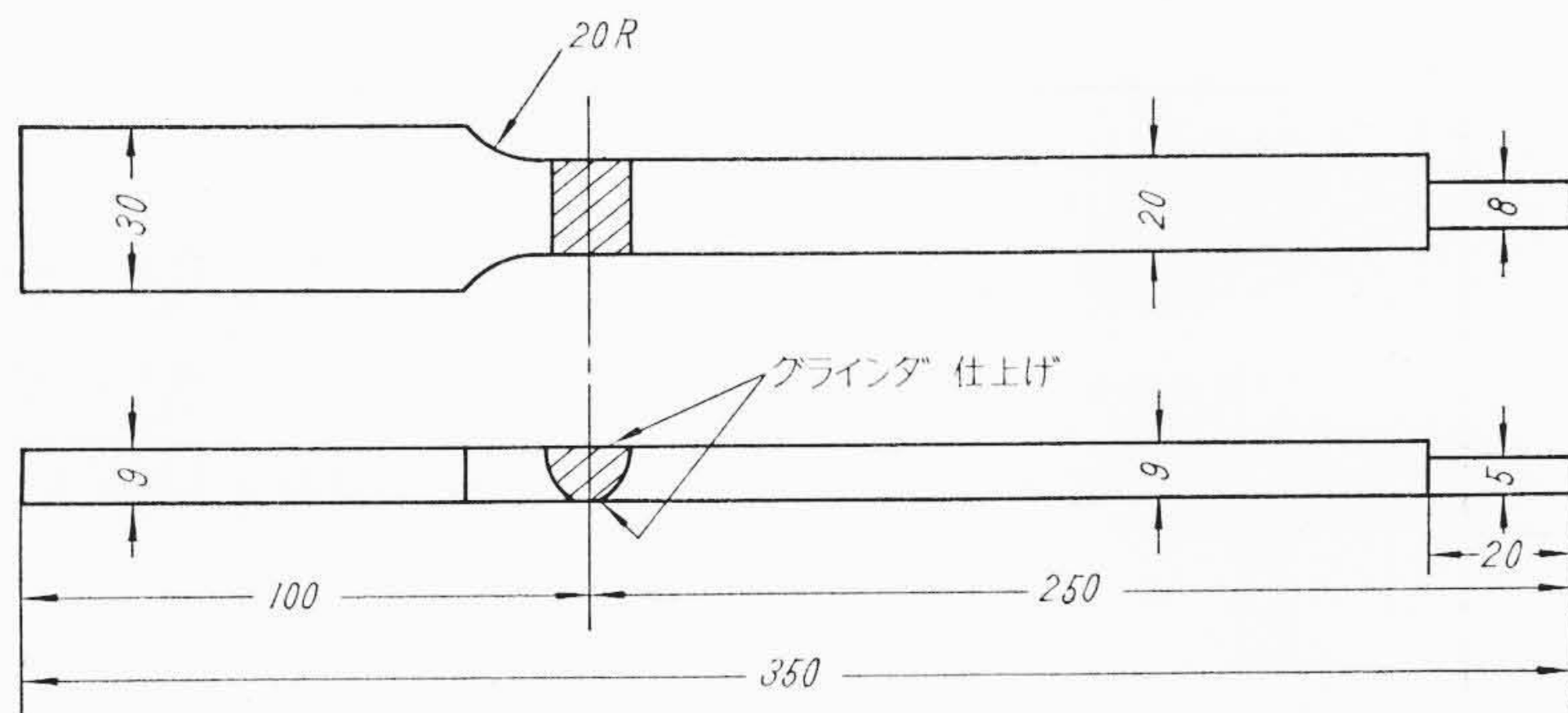
第2表 熔 接 条 件

施工場所名	姿 勢	熔接場所	熔 接 棒	棒 の 乾 燥	熔 接 電 流(A)	層 数	開 先	備 考
A	立 立 向 向	工 現 場 地	L B-26 (3.2 ϕ) B-17 (3.2 ϕ)	300°C 1H 出庫のまま	90~110 90~110	4 4	(A) (A)	
B	立 立 下 下 向 向 向 向	工 現 工 現 場 地 場 地	B-17 (3.2,4 ϕ) B-17 (3.2,4 ϕ) B-17 (4 ϕ) B-17 (4 ϕ)	70°C 0.5~6.5H 70°C 6.5~10H 70°C 5~6.5H 70°C 9~10H	80~150 100~150 115~180 160~200	5~6 5 4 5~6	(A) (A) (A) (A)	開先の加工はガス切りと機械加工の2種
C	立 立 下 下 向 向 向 向	工 現 工 現 場 地 場 地	B-17 (4 ϕ) B-17 (4 ϕ) B-17 (4 ϕ) B-17 (3.2 ϕ)	乾 燥 す る 乾 燥 せ ず 乾 燥 す る 乾 燥 せ ず	135~170 140~150 135~170 140	3 3 4 5	(A) (A) (A) (A)	
D	下 下 下 下 向 向 向 向	工 現 工 現 場 地 場 地	F X-1 (4 ϕ) F X-1 (4 ϕ) F X-1 (4 ϕ) F X-1 (4 ϕ)	特 に行 わ ず 特 に行 わ ず 特 に行 わ ず 特 に行 わ ず	180~200 180~200 180~200 180~200	3 3 3 3	(A) (A) (C) (C)	現地熔接は屋内の高所にて不十分な状態で行う
E	下 下 下 下 向 向 向 向	工 現 工 現 場 地 場 地	B-17 (4 ϕ) B-17 (4 ϕ) B-17 (4 ϕ) B-17 (4 ϕ)	乾 燥 十 分 乾 燥 せ ず 乾 燥 十 分 乾 燥 せ ず	160~190 160~200 120~190 130~200	7 6 5+3 5+3	(A) (A) (B) (B)	風速 1~2 m/s 屋内 風速 2~3 m/s 屋外
F	下 下 上 上 向 向 向 向	工 現 工 現 場 地 場 地	B L-17 (4 ϕ) B L-17 (4 ϕ) B L-17 (4 ϕ) B L-17 (4 ϕ)	— — — —	160~185 170~200 115~130 125~135	5 4 3 3	(A) (A) (A) (A)	
G	立 立 向 向	工 現 場 地	B-17 (3.2 ϕ) B-17 (3.2 ϕ)	80°C 0.5H 80°C 0.5H	130~150 130~150	3 3	(A) (A)	屋内にて作業困難な熔接

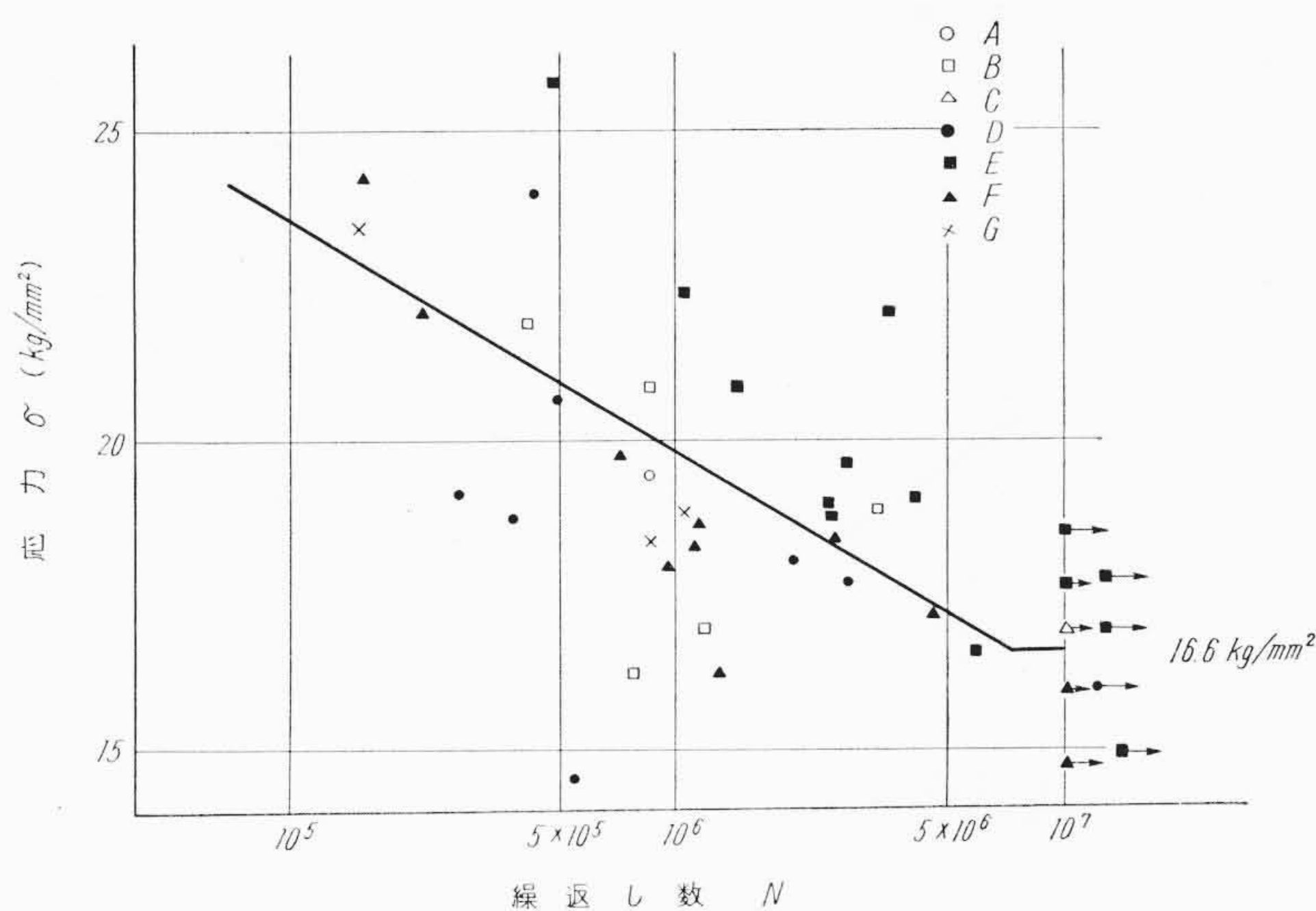
* 日立製作所日立研究所



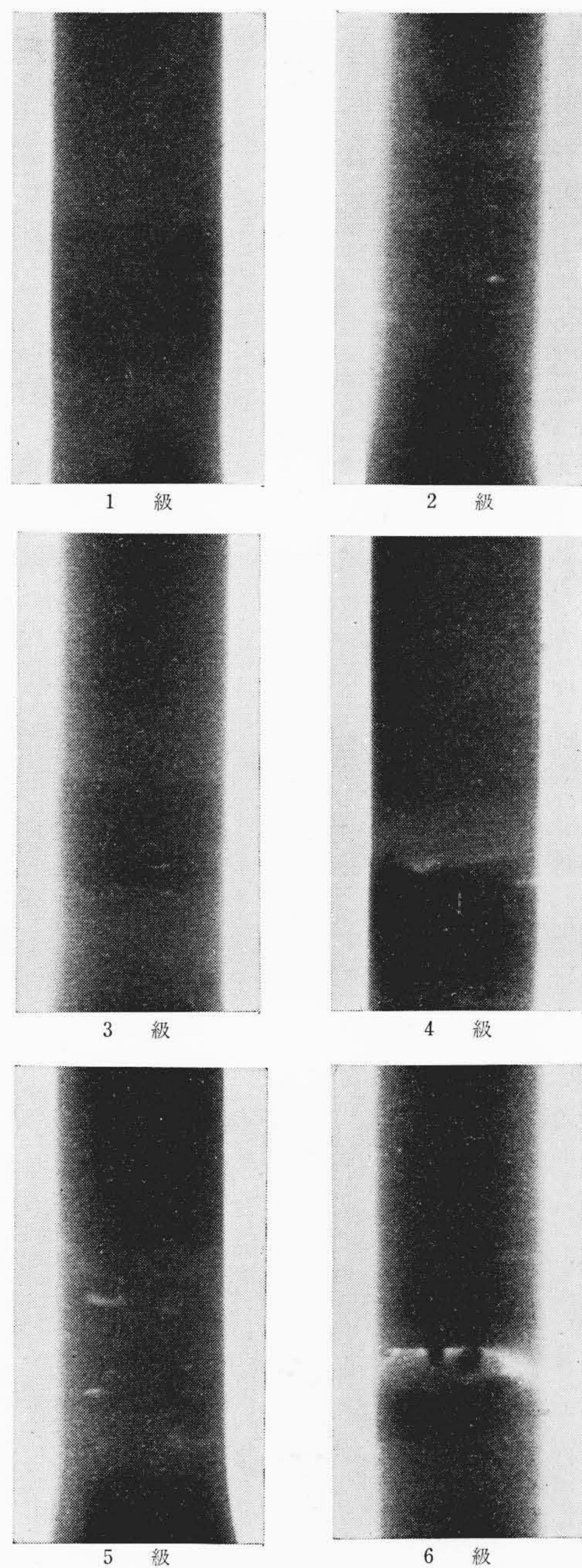
第1図 熔接部開先形状



第2図 疲れ試験片の形状および寸法



第4図 工場熔接1級のS-N曲線



第3図 代表的欠陥のX線写真

試験片の開先形状を第1図に示す。(A)は裏アテ金熔接で、アテ板は熔接後除去した。(B)は初層部の欠陥の含まれやすい部分を裏ハツリ熔接したもの(C)は(B)と同一開先であるが裏ハツリ熔接をしないものである。熔接施工は1, 2, 3級に格付された熔接士によって行われた。

2.3 疲れ試験片および試験機

前述の熔接試験片より第2図に示すような疲れ試験片を採取した。試験片の表面仕上げは行わず、熔接後の応力除去焼なましも行っていない。熔接ビードの余盛りは、研削仕上げを行った。疲れ試験は自家製平面曲げ疲れ試験機(1,450 rpm)を用い、両振平面曲げ疲れ試験を行った。疲れ強さは 10^7 回における値で示し、破損しなかった試験片は静的引張試験を行って疲れき裂の有無をしらべた。

2.4 欠陥のX線検査

疲れ試験片作製後以下の条件でX線透過写真を撮影した。

電圧 240 kVP, 電流 4 mA, 露出時間 30 s

こうして得られたX線フィルムの判定は、JIS Z 2341 で行い各等級に分類した。第3図に各級の代表的写真を示す。

2.5 実験点の整理

熔接試験片が各施工場所で種々の熔接条件で作製されたため、疲れ試験における実験点のばらつきは当然予想されたので以下の整理方法をとった。時間強度線は $\sigma = \sigma_1 - k \log \frac{N}{N_1}$ であらわされるものとし、各実験点にもっともよく合うような直線を決めた。ここに σ_1 は特定の繰返し数 N_1 における値、 k は定数でS-N曲線のこう配をあらわす。各実験点の値から最小自乗法を用いて σ_1 , k の値をきめた。

疲れ強さは繰返し数 10^7 回以上で破損しなかった各応力段階の算術平均とし、時間強度線や実験点を考慮して多少の修正を加えた。また実用上のことを考え、疲れ強さの5%および95%信頼限界値を求め、これらを上限および下限とし、疲れ強さのばらつき範囲を示した。

3. 実験結果

3.1 疲れ試験結果

X線の各等級に分類した試験片についての疲れ試験結果から得ら

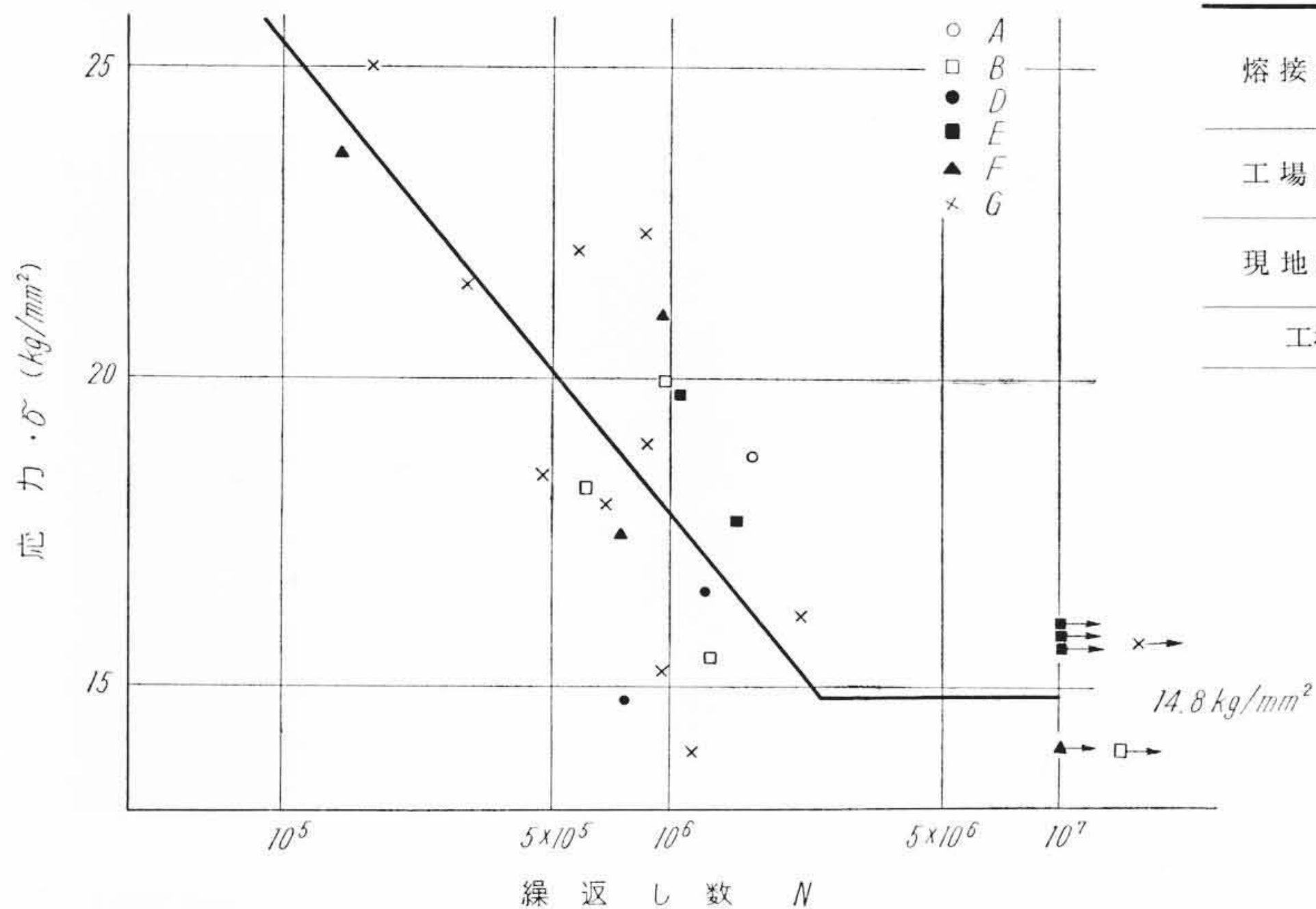
れた $S-N$ 曲線を、工場熔接については第 4~9 図に、現場熔接については第 10~15 図に示す。これらの結果から 10^7 回の繰返し数における疲れ強さを求め表示すると第 3 表のようになる。また欠陥の等級によって疲れ強さが低下する割合を 1 級の疲れ強さを 100 として求めると、第 4 表のようになる。すなわち工場熔接では 2 級で約 10%，3, 4 級で約 20%，5 級で約 30%，6 級で約 40% 疲れ強さが低下するとみてよい。また現地熔接では 1 級を除いて工場熔接より弱く、疲れ強さが 10~20% 低下するものとみられる。以上の結果を図示すると第 16 図のようになる。

第 3 表 各等級試験片の疲れ試験結果

熔 接 条 件	応 力	信頼度 (%)	疲 れ 強 さ (kg/mm ²)					
			JIS 等 級					
			1	2	3	4	5	6
工 場 熔 接	上 限	5	19.6	16.2	17.9	13.8	16.0	10.7
	平 均	50	16.6	14.8	13.8	12.7	12.3	9.4
	下 限	95	13.6	13.4	9.7	11.6	8.6	8.1
現 地 熔 接	上 限	5	19.4	15.9	15.4	11.8	13.3	11.7
	平 均	50	16.9	13.9	12.4	11.0	10.3	8.8
	下 限	95	14.4	11.9	9.4	10.2	7.3	5.9

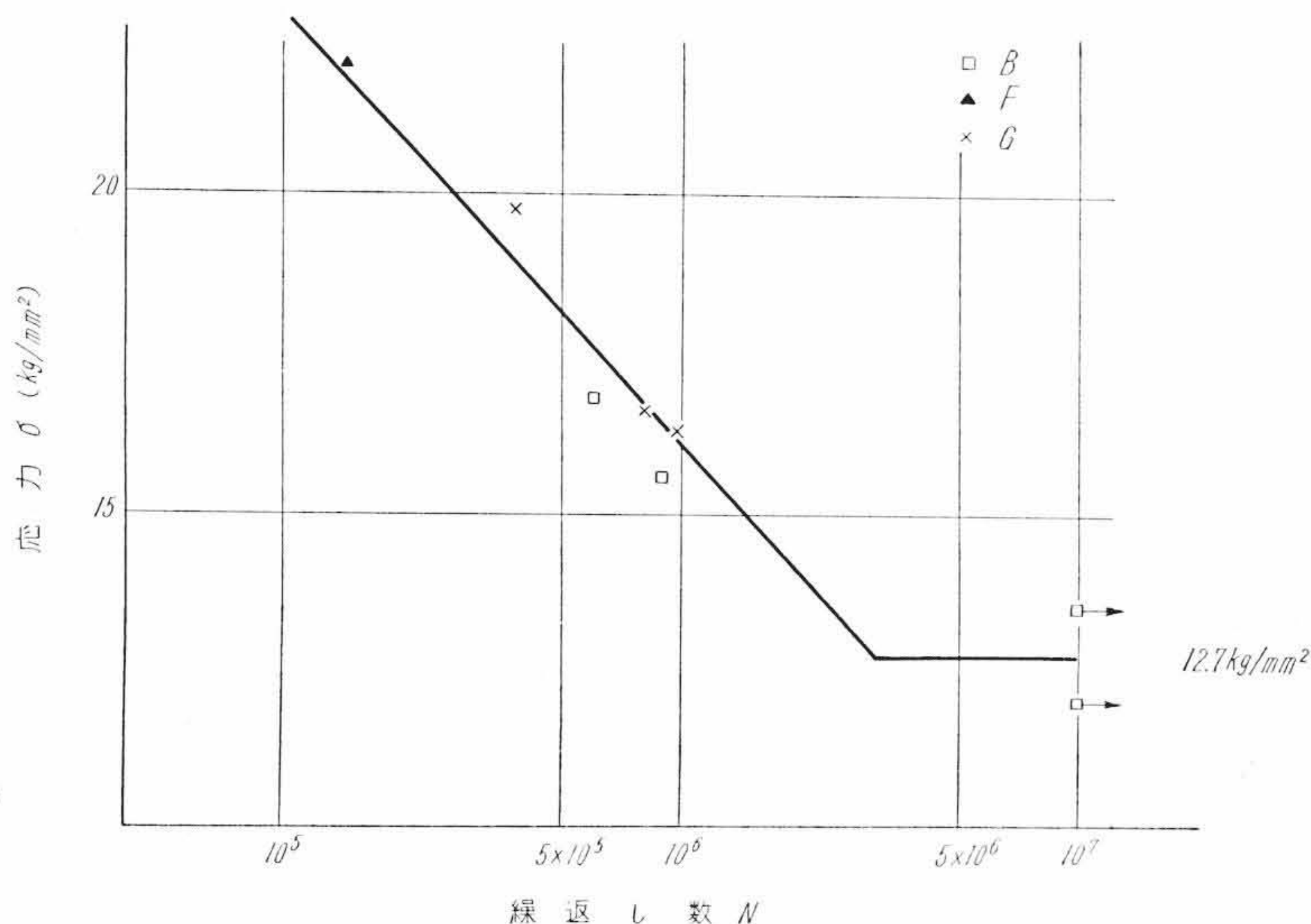
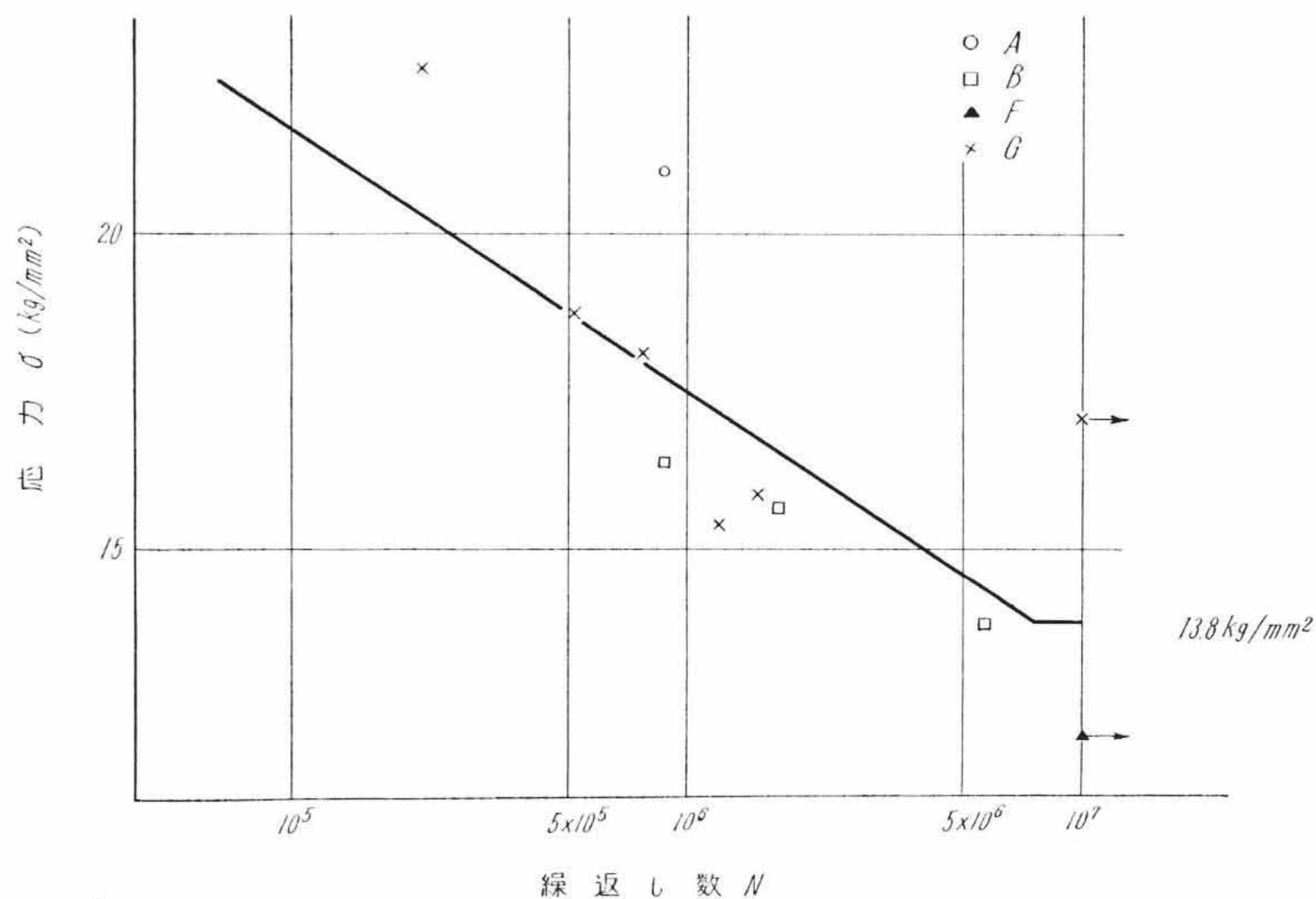
第 4 表 欠陥による強さ低下の割合

熔 接 条 件	疲れ強さ (kg/mm ²)	JIS 等 級					
		1	2	3	4	5	6
工 場 熔 接	平均値	16.6	14.8	13.8	12.7	12.3	9.4
	割合 (%)	100	89	83	77	74	57
現 地 熔 接	平均値	16.9	13.9	12.4	11.0	10.3	8.8
	割合 (%)	100	82	73	65	61	52
工場熔接/現地熔接		0.98	1.06	1.11	1.15	1.19	1.07

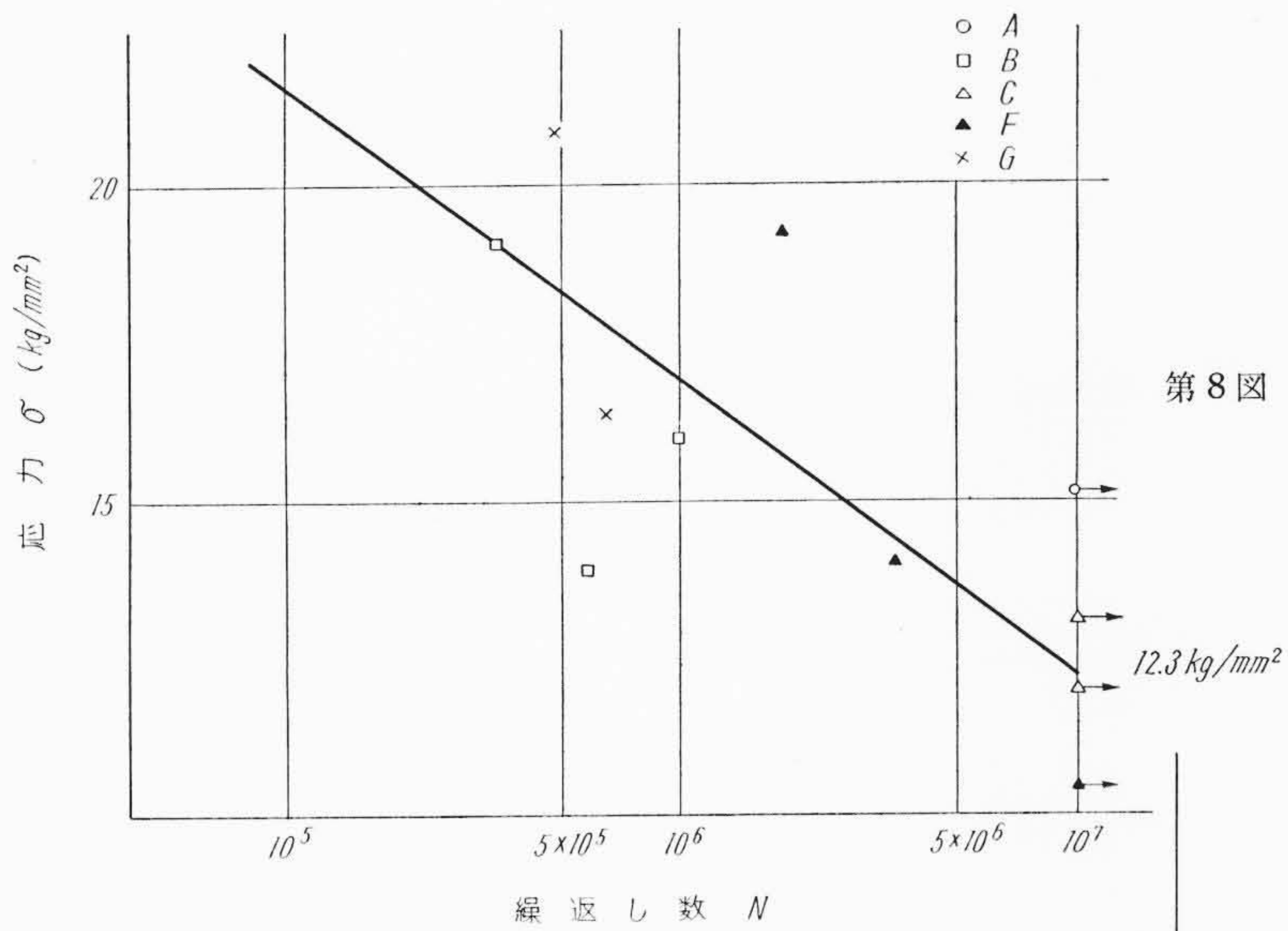


第 5 図 工場熔接 2 級の $S-N$ 曲線

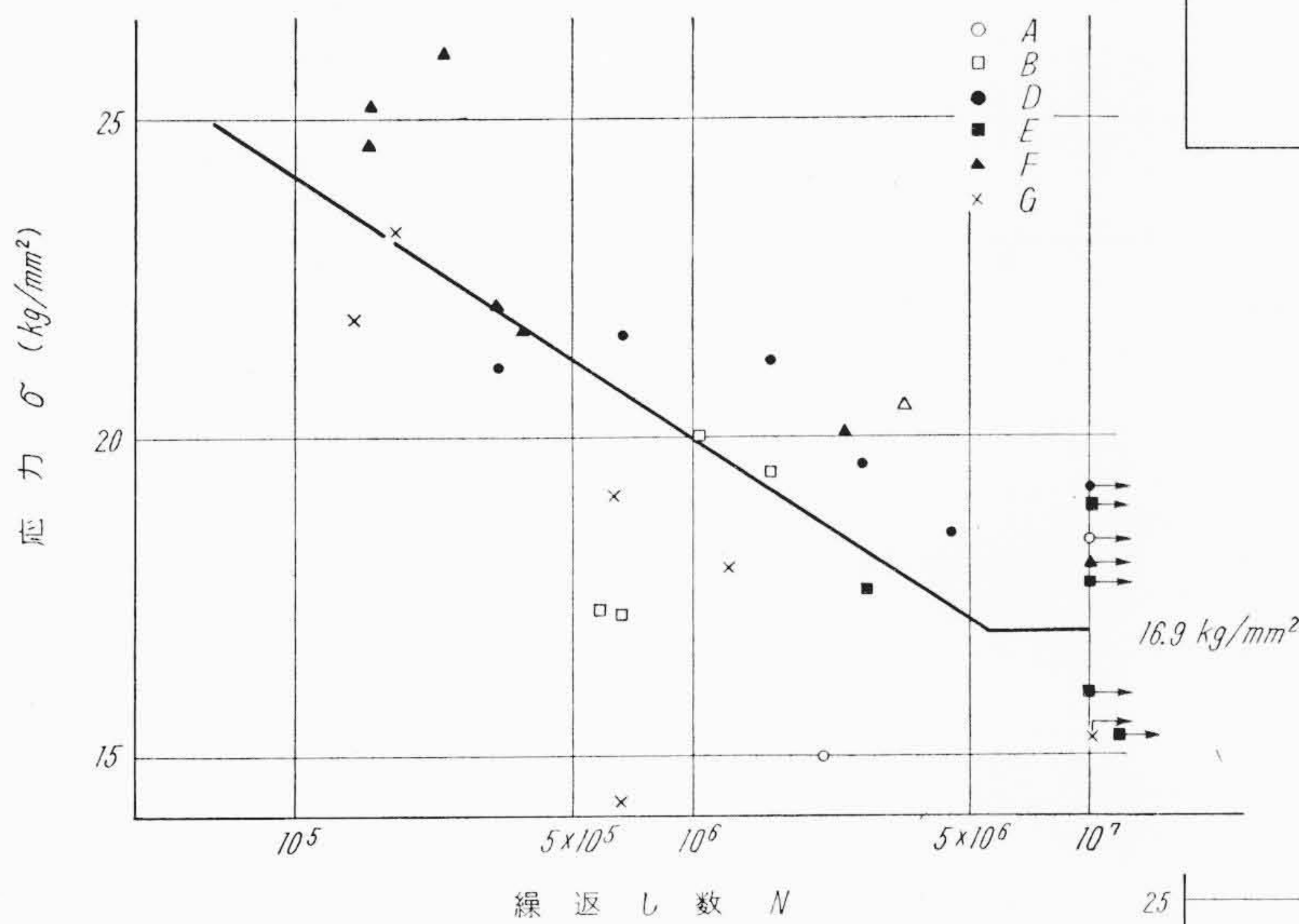
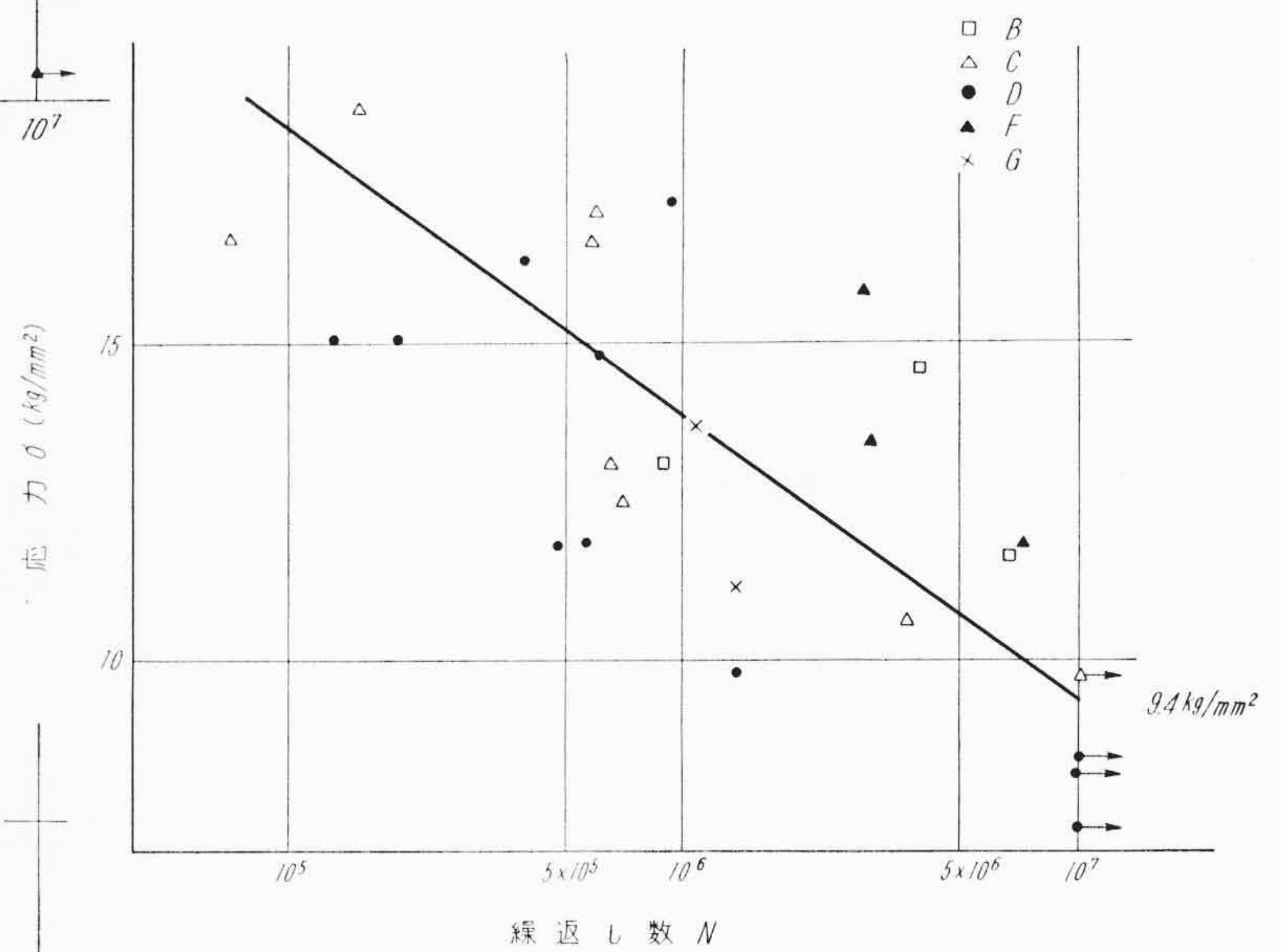
第 6 図 工場熔接 3 級の $S-N$ 曲線



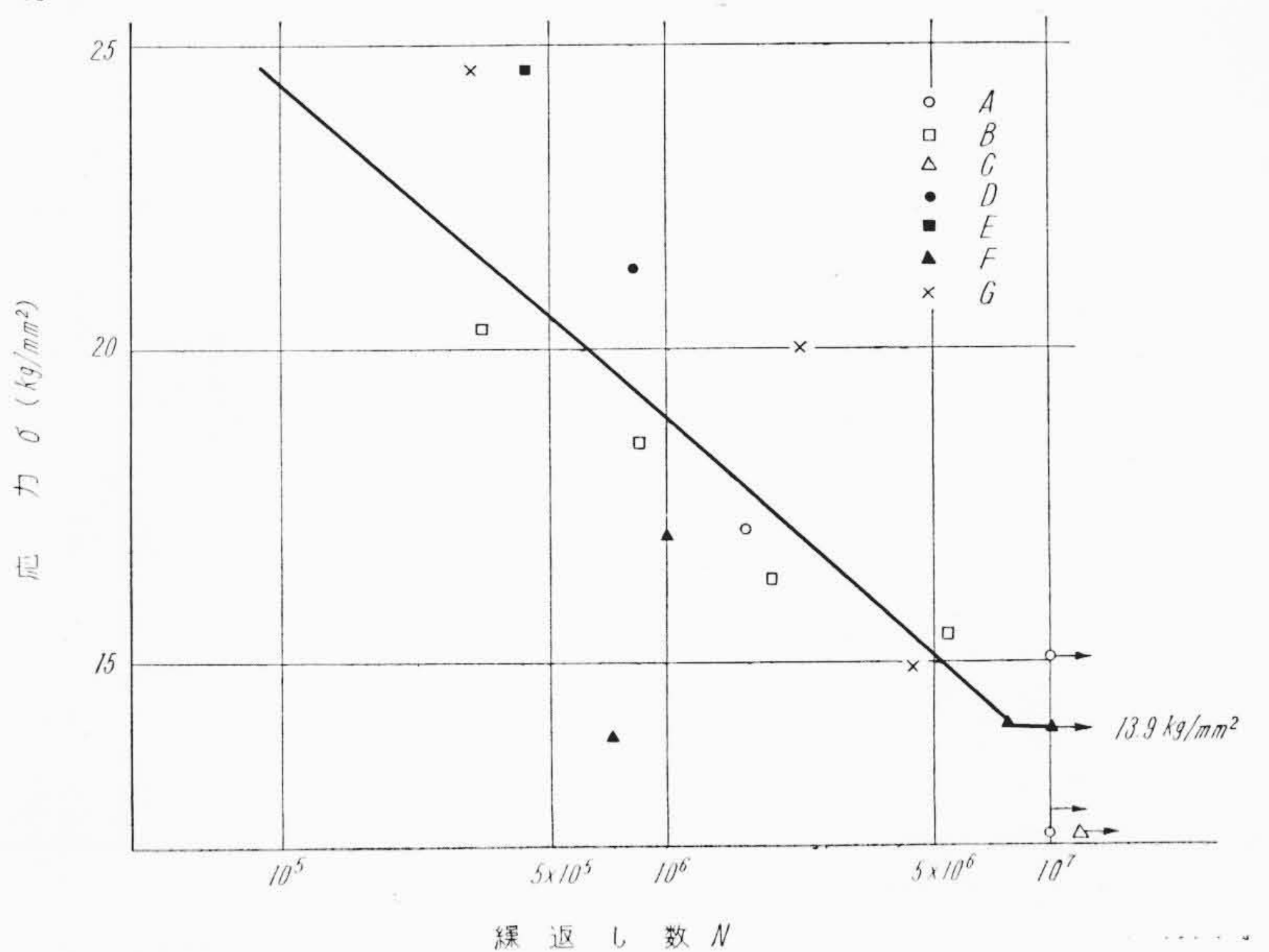
第 7 図 工場熔接 4 級の $S-N$ 曲線

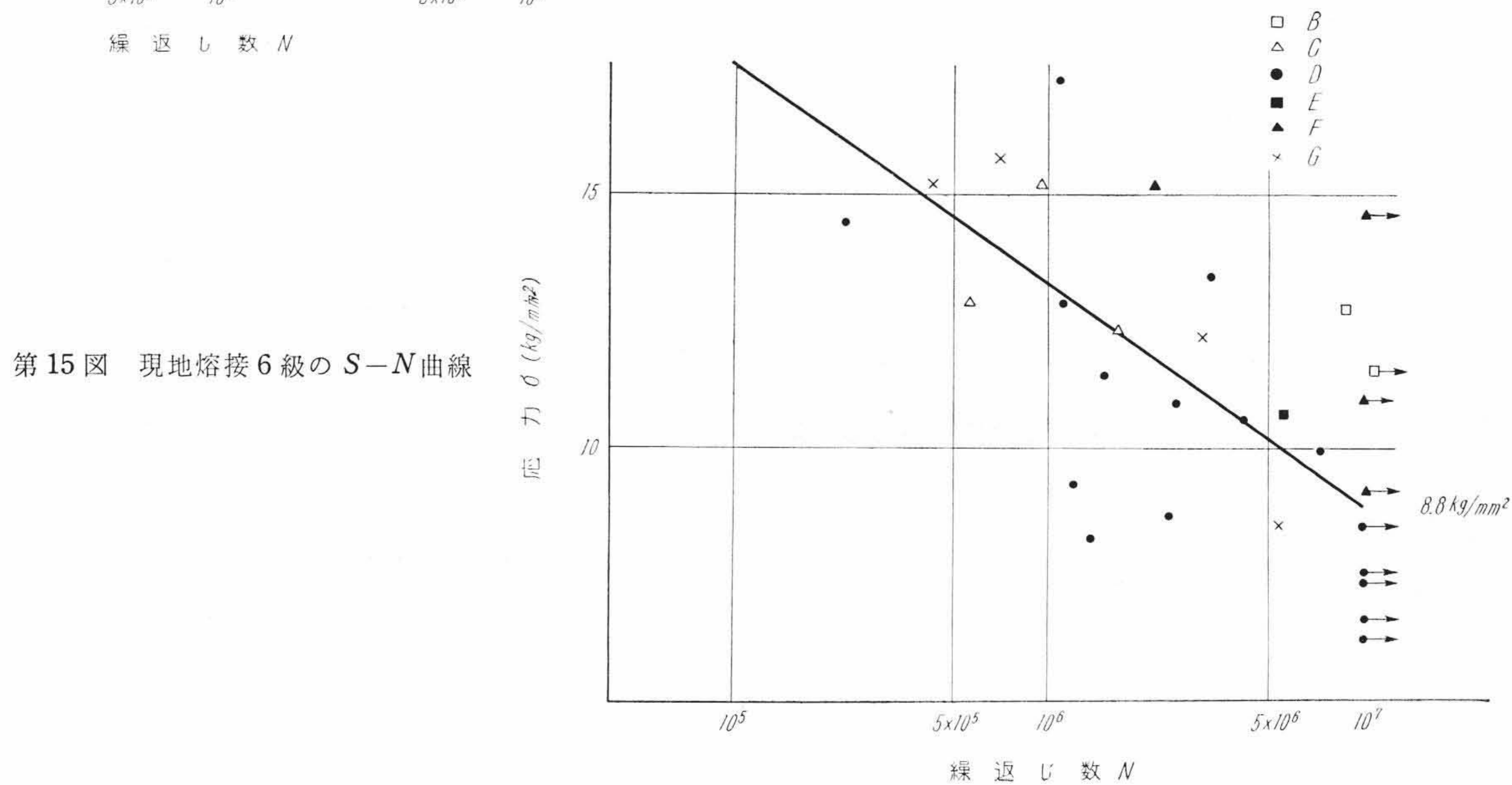
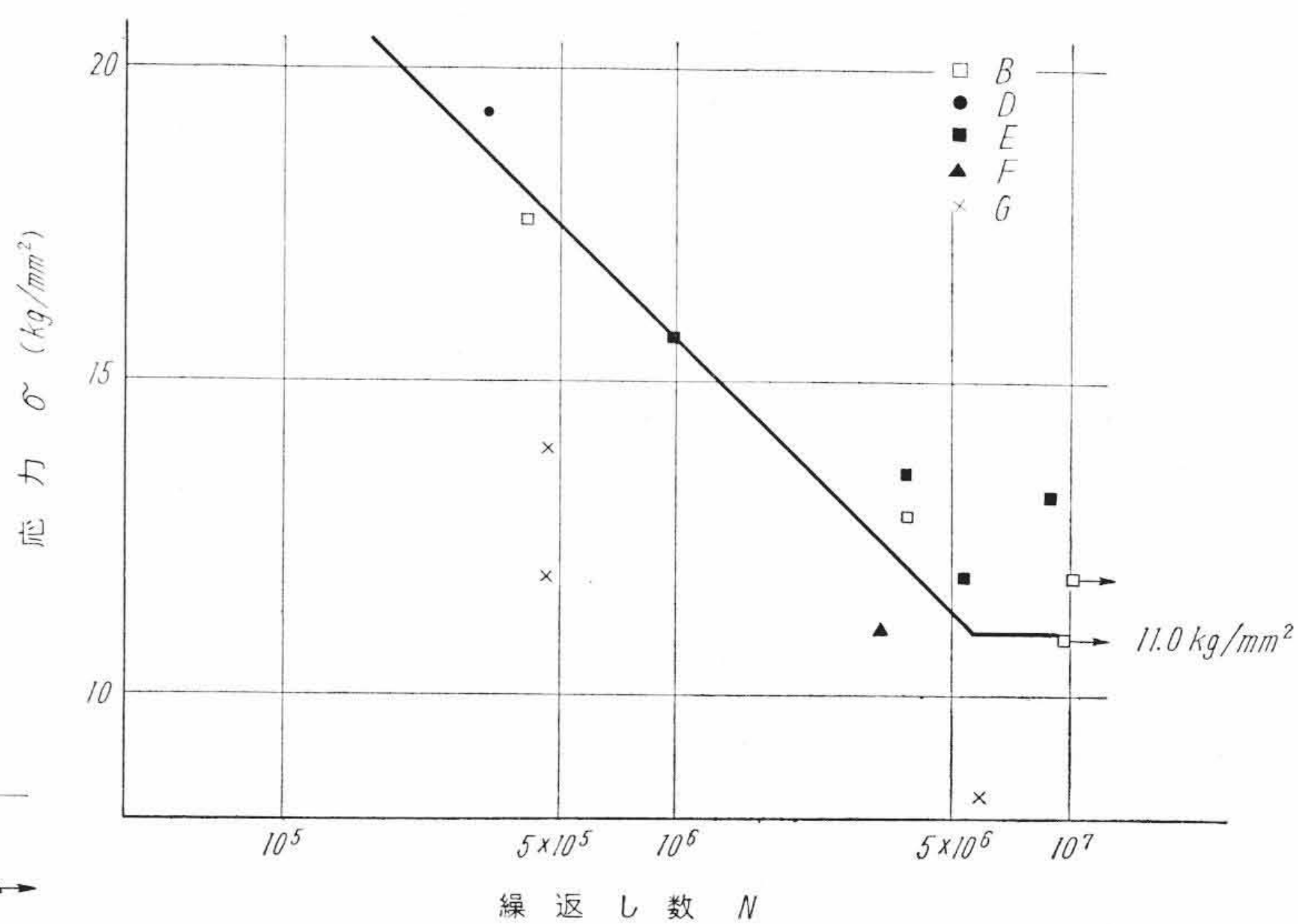
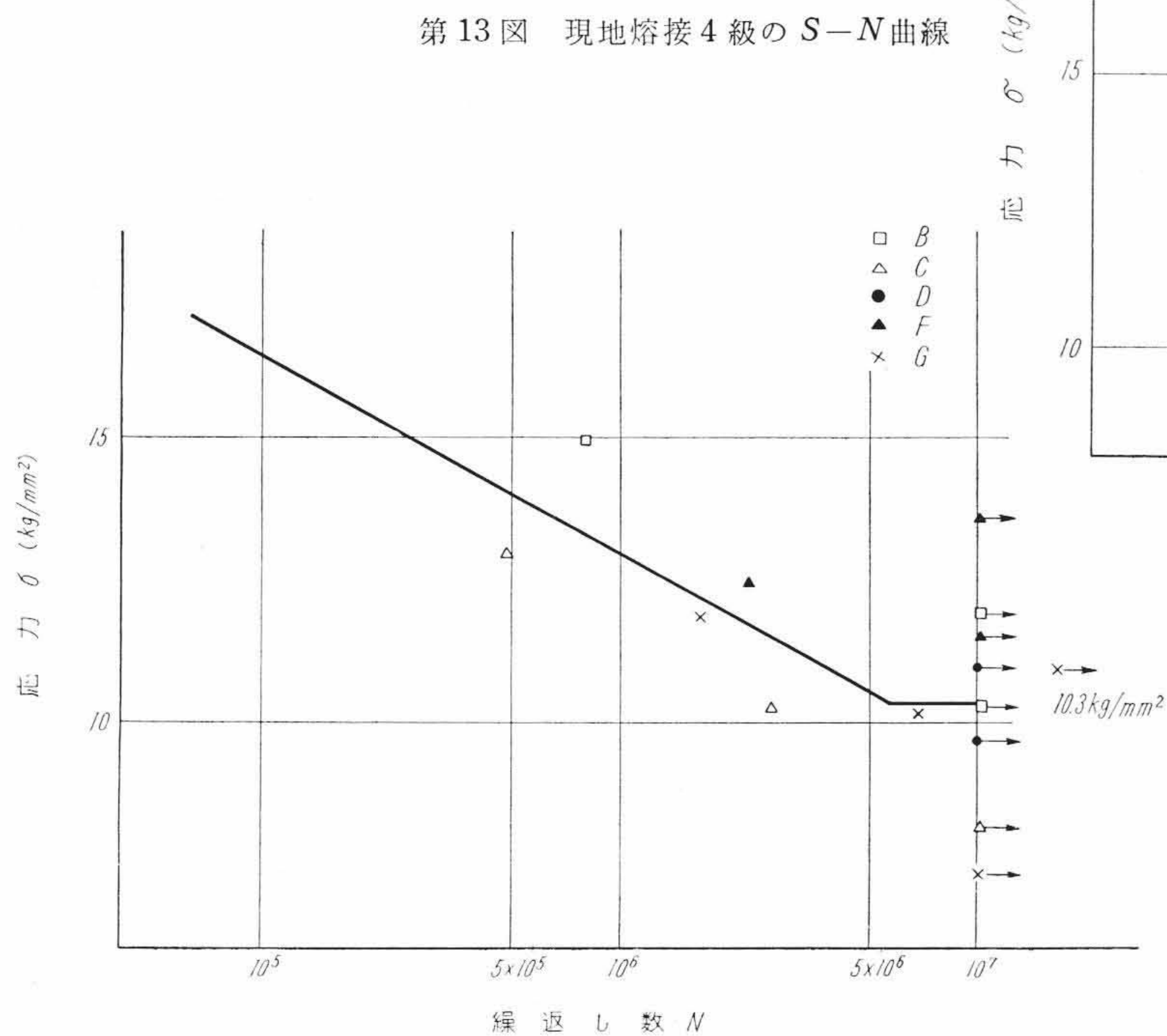
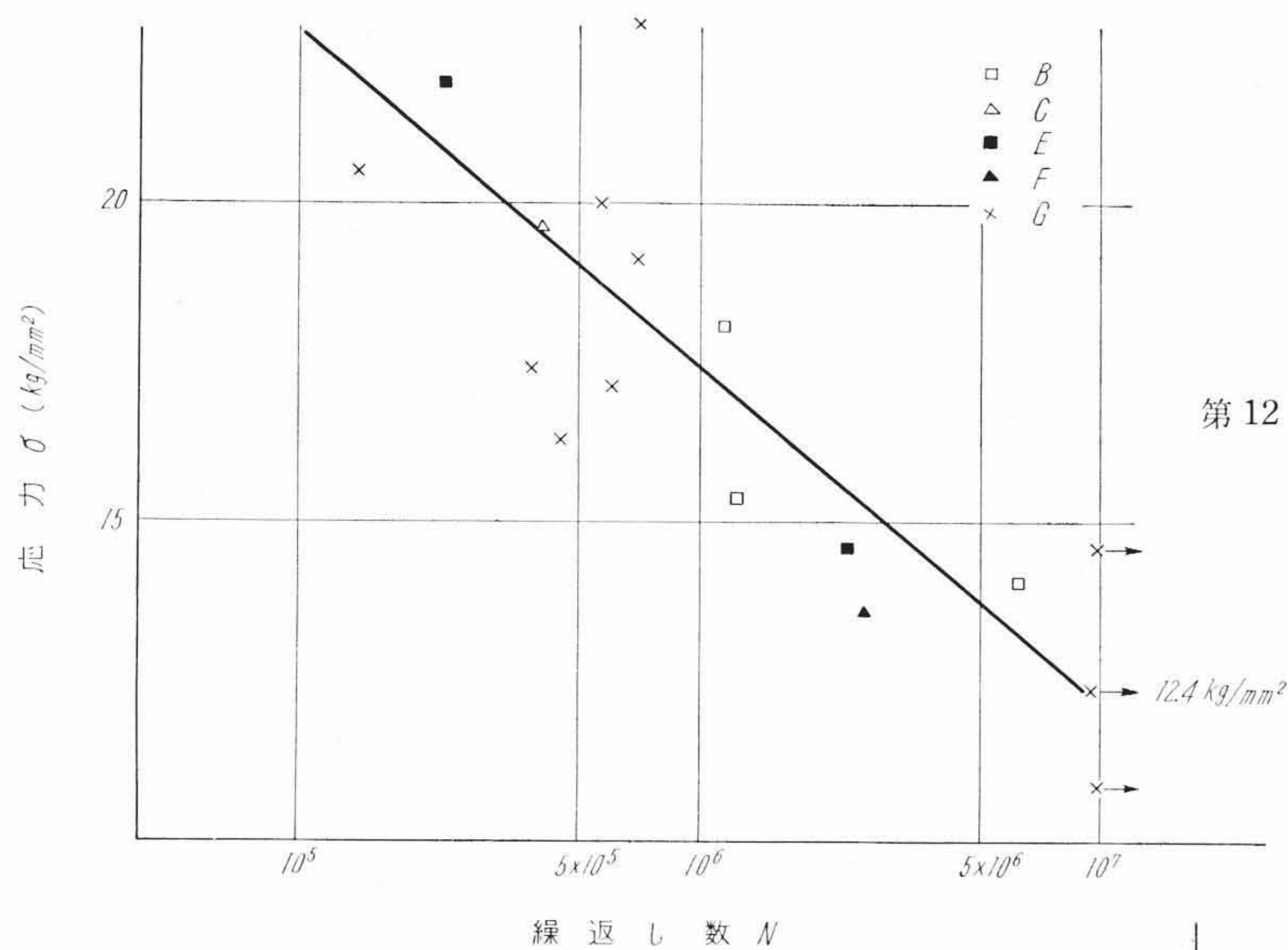


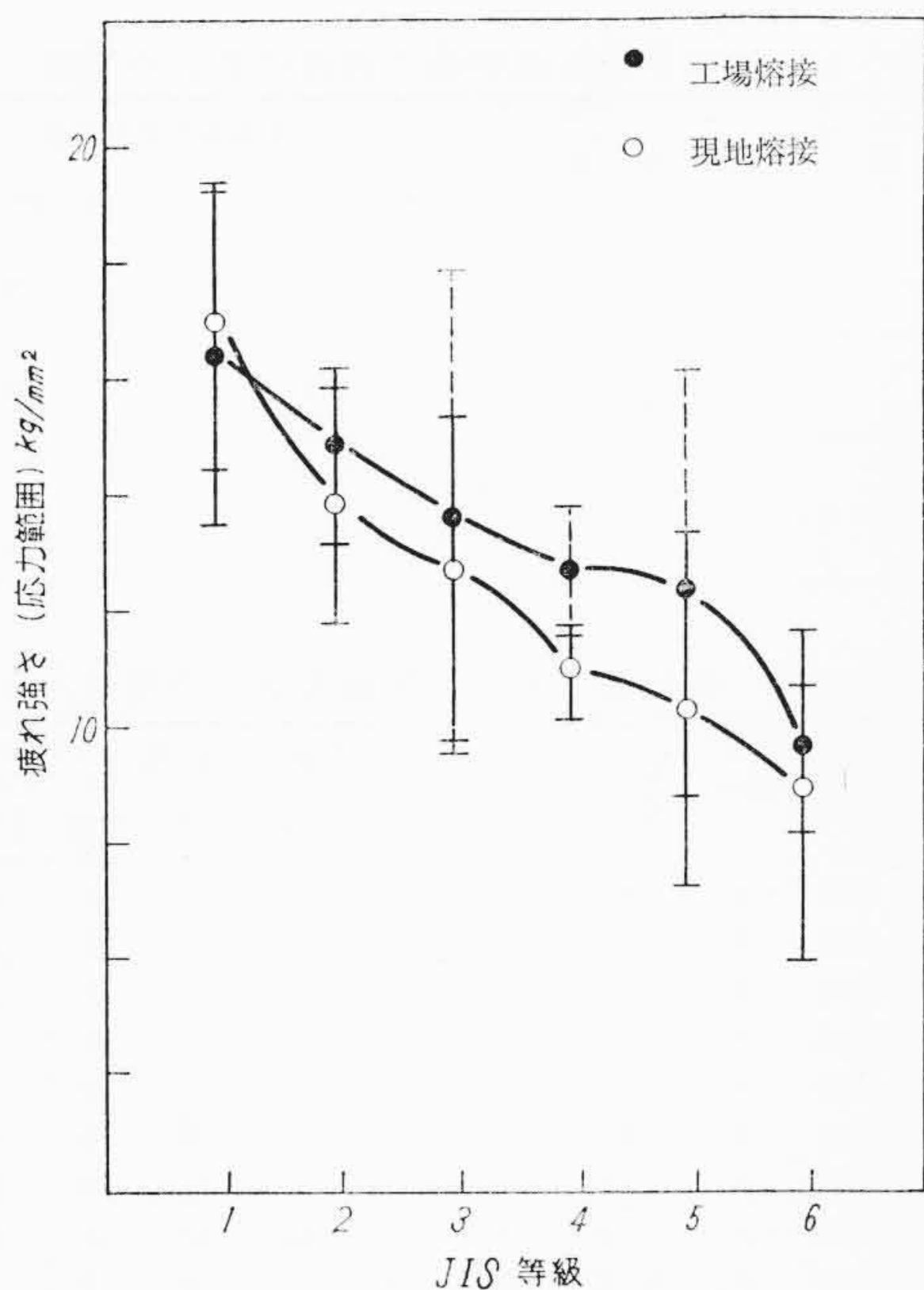
第9図 工場熔接6級のS-N曲線



第11図 現地熔接2級のS-N曲線







第16図 JIS 欠陥等級と平面曲げ疲れ強さ

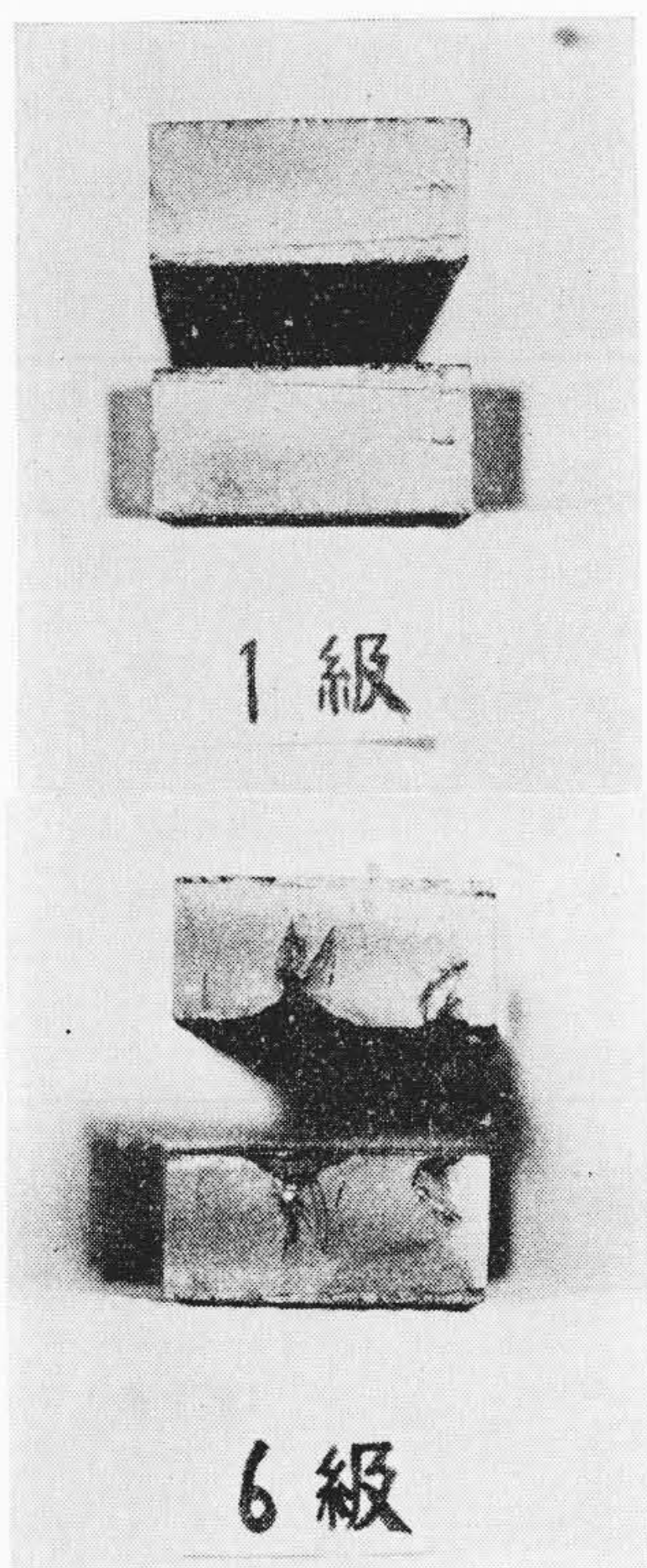
試験片の疲れ破面の代表的な例を第17図に示す。1, 2級のものでは熱影響部で破壊しており、3級以下では破面にブローホールや初層の非熔着、スラグのまきこみが認められ、疲れ破壊がこれら欠陥より進展した状況がみられる。

3.2 熔接部のかたさ分布および顕微鏡組織

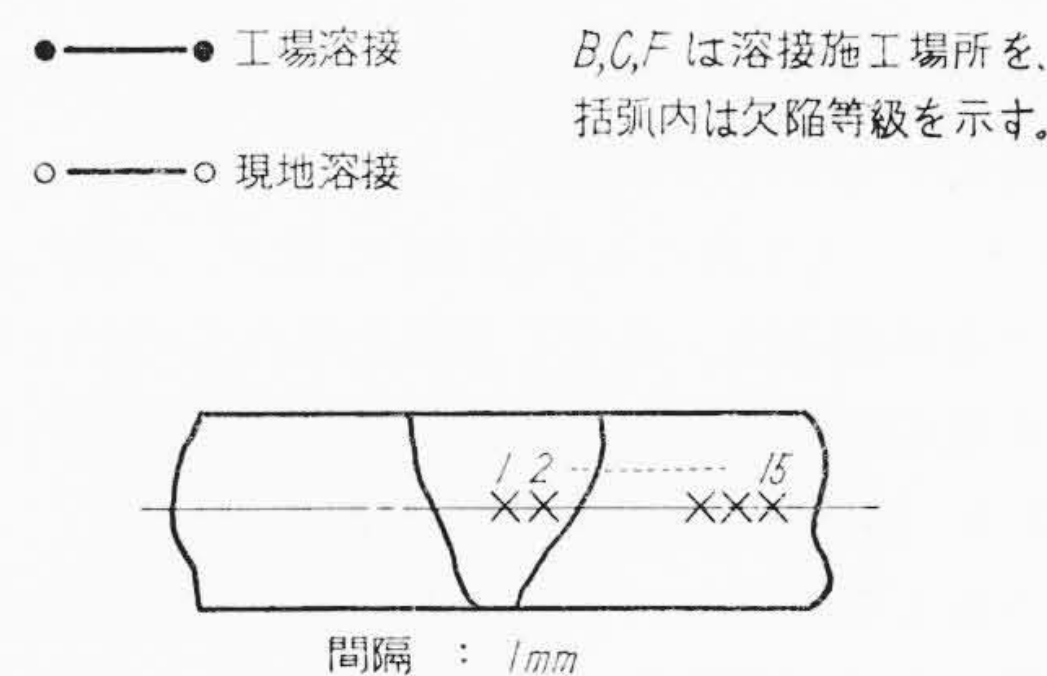
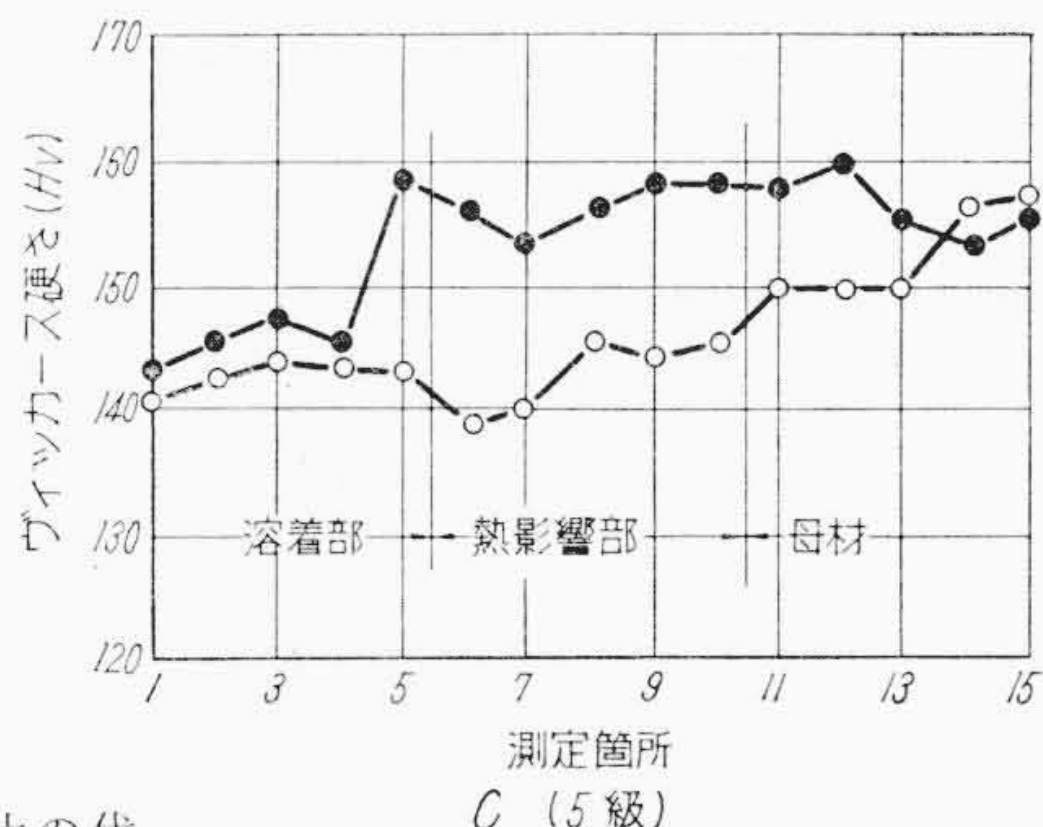
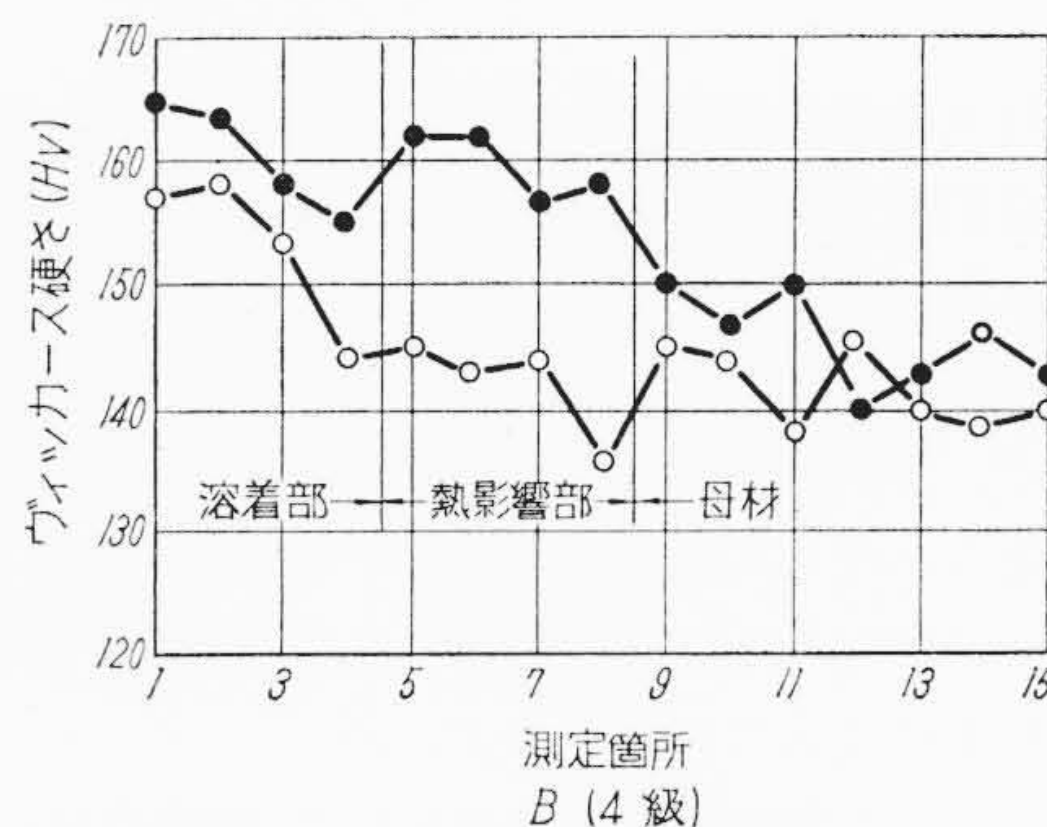
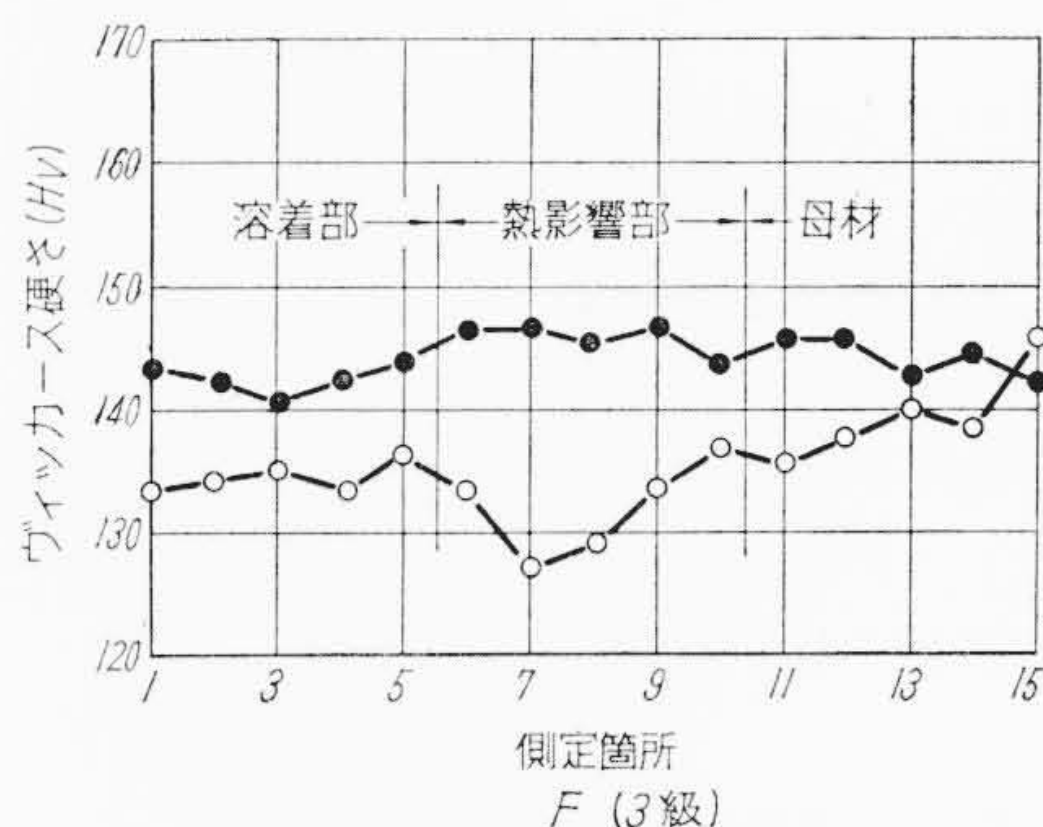
疲れ試験の結果工場溶接と現地溶接の試験片とで、疲れ強さの差がみられたので、検討するために、両者の溶接部についてかたさと組織をしらべた。開先形状(A)のもので欠陥等級3, 4, 5級と判定されたものにつきかたさ分布を調べた結果、第18図のように求まった。これらから熱影響部のかたさは、いずれも現地溶接の場合のほうが低いことがわかる。また第19図の顕微鏡写真からわかるように、初層および最終層の熔着鋼は、現地溶接のほうが粒子が大きくなっている。これらは、工場と現地の溶接環境、溶接条件の相異によるものと思われるが、現地の場合冷却速度が工場よりゆるやかであったとも考えられる。これは狭いところで溶接したことも一因であろう。かたさの低下や結晶粒子の粗大が、現地の疲れ強さを低下させた一つの原因と考えてよい。

3.3 ほかの実験結果との比較

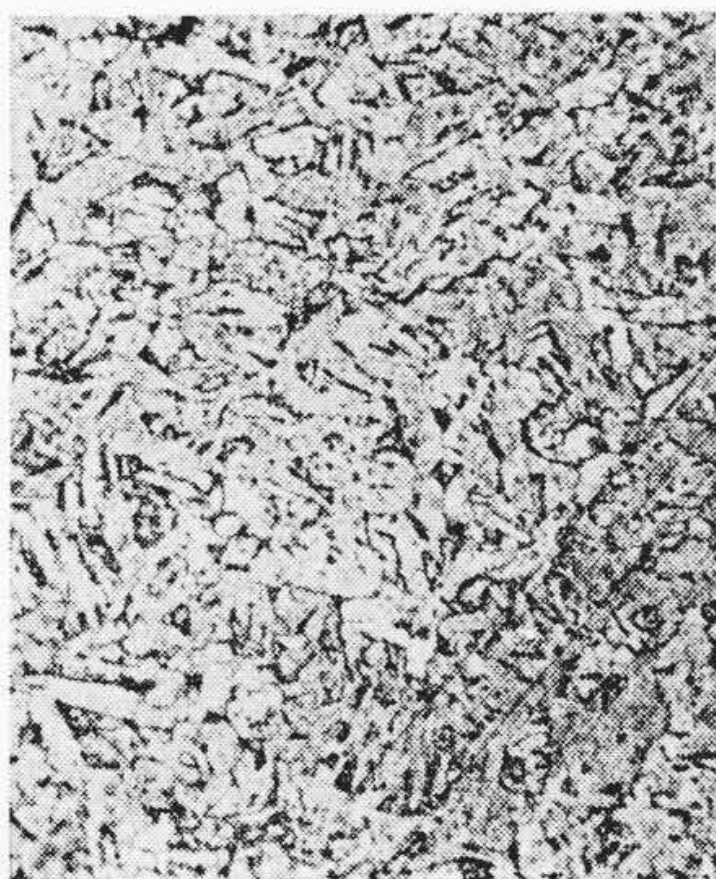
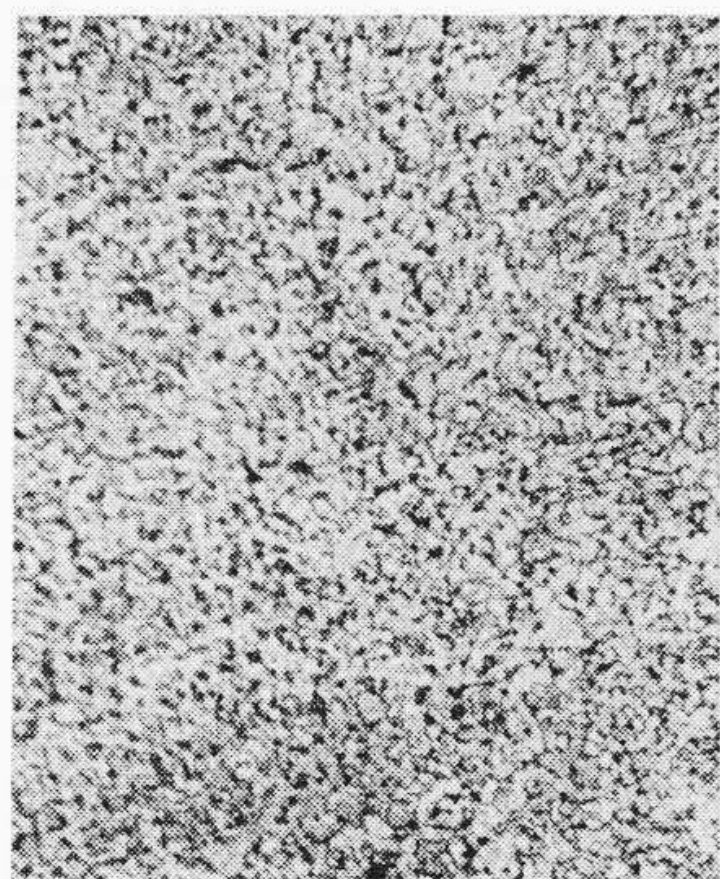
この実験結果から得られた欠陥の等級と疲れ強さの関係を、前述



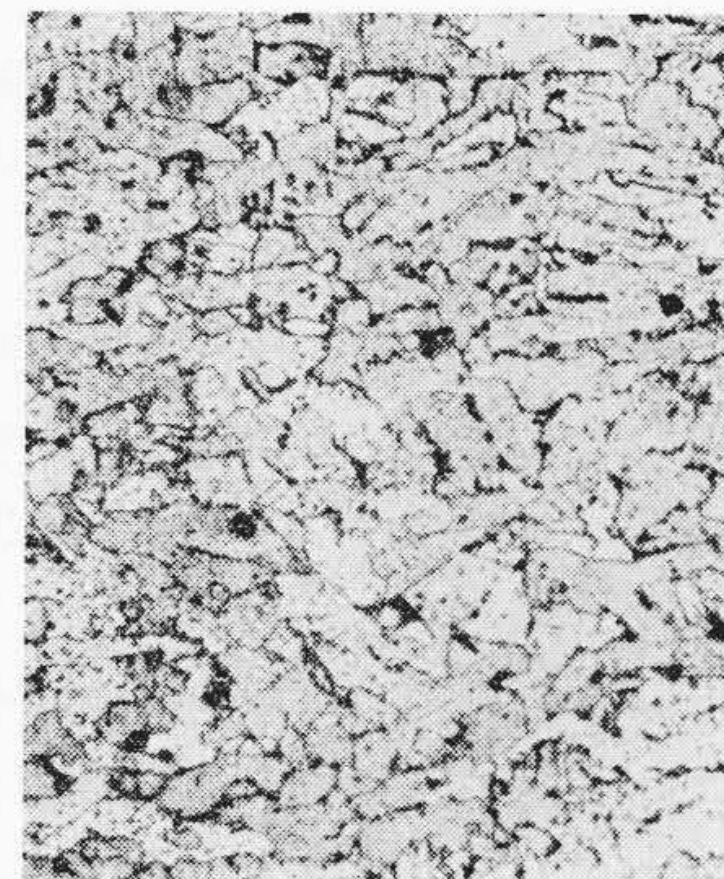
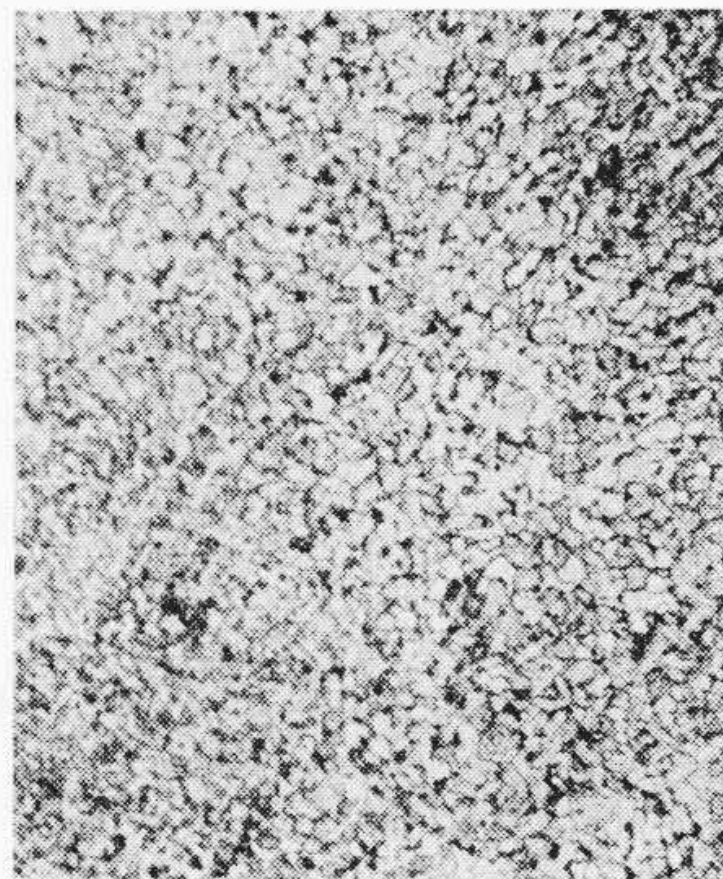
第17図 試験片の代表的な疲れ破面



第18図 熔接部のかたさ分布

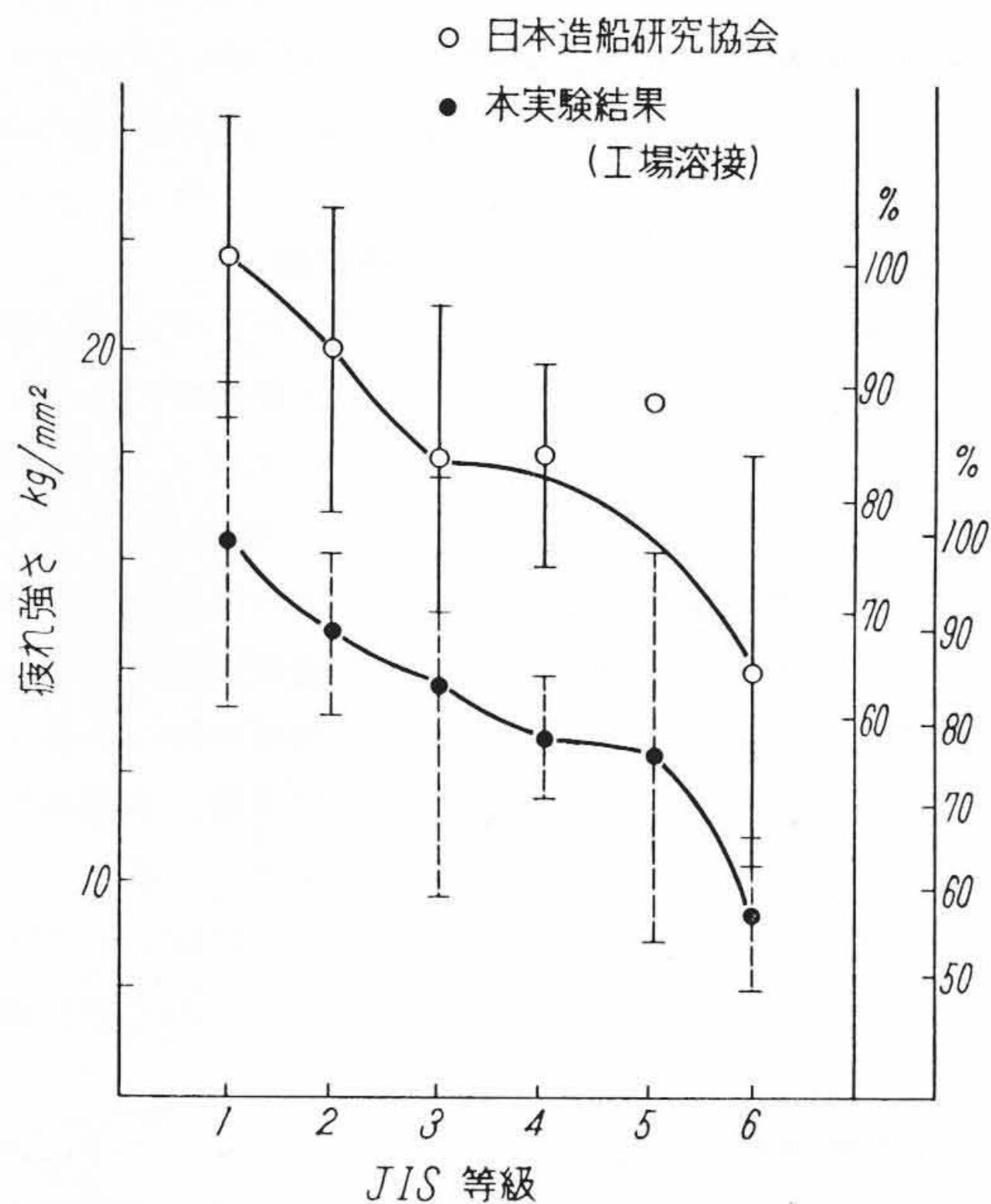


(a) 工場溶接 (×100)



(b) 現地溶接 (×100)

第19図 熔着金属の顕微鏡組織



第 20 図 片振れ引張り強さと両振曲げ強さとの比較

の日本造船研究協会の結果と比較すると第 20 図のようになる。日本造船研究協会の実験値が本実験値よりも高く出ているのは、荷重が片振引張荷重であること、疲れ強さが 2×10^6 回の繰返数で求められていることによるものと考えられるが、両者の傾向はよくにている。本実験の場合は板厚が割に薄く、欠陥が熔込み不良やスラグ巻込みとなって多く表面層近くにあり、曲げに対してきいたことも考えねばならない。構造物の部材が曲げを受ける場合には、この実験結果によって判定してよい。

これらの実験結果を参考として、熔接設計には、熔接の等級を 3 つの級にわけて、基準強さ低減係数を第 5 表のように選定することを提案する。すなわち 6 級に属する継手は強さの設計には用いない。5 級は変動応力の場合には用いない。完全な無欠陥の継手に対して変動応力を受ける場合は、2 級までに合格したものは低減係数を 0.9 とし、3, 4 級のものは 0.8 に選ぶ。一般に求められている熔接継手の基準強さは、必ずしも無欠陥のものではないので、第 5 表の低減係数を用いばいくぶん安全側に設計されることになる。

3.4 熔接施工条件と欠陥等級の関係

各施工場所において熔接士の級別、熔接姿勢、場所をかえて種々の開先条件で試験片が作製され、それを X 線検査によって等級別に分類したのが第 6 表である。おのおのの条件で各級の試験片本数と級との積の和を、1 本あたりの平均等級であらわすことにした。この平均等級と熔接条件との関係から次のことがわかった。

- 熔接開先については、当然予想されることながら、(B) の裏ハツリをしたものが最も上級であり、ついで(A) の裏アテ金のあるもの、最も低い等級のものは(C) の V 開先で熔接のままのものとなっている。
- 工場熔接と現地熔接では、欠陥等級にほとんど差が認められない。それにもかかわらず前述のように疲れ強さに両者の間で差がみられたのは、X 線で検出される欠陥以外に強さを低下させる因子があることを示している。
- 熔接士の級別が欠陥発生に及ぼす影響を調べると、第 7 表のように求まり、工場熔接の下向のように熔接環境や作業姿勢が楽な場合は、ほとんど級間に差が認められない。現地熔接ではやや差があらわれている。立向姿勢で熔接が困難になると工場、現地とも 1 級熔接士がすぐれてはっきり技両の差があらわれてくる。

第 5 表 欠陥等級と基準強さ低減係数との関係

熔 接 級 別	JIS 等 級	基準強さ低減係数	
		静 応 力	変 動 応 力
1	1 2	1.0	0.9
2	3 4	0.9	0.8
3	5	0.8	—
級 外	6	—	—

第 6 表 熔接施工条件と X 線等級との関係

熔接士	熔接姿勢	熔接場所	開先	施 工 場所名	試 験 片 本 数						平均 等級
					1 級	2 級	3 級	4 級	5 級	6 級	
1 級	上向	工場	(A)	F	2	1	1	2	4	4	4.2
1 級	上向	現地	(A)	F	1	3	1	3	2	5	4.1
1 級	立向	工場	(A)	A.G	13	16	9	7	4	3	2.7
1 級	立向	現地	(A)	A.G	8	16	13	4	6	4	2.9
1 級	下向	工場	(A)	F	10	5	0	0	0	0	1.3
1 級	下向	現地	(A)	F	11	2	2	0	0	0	1.4
2 級	立向	工場	(A)	C.B	0	2	14	11	10	10	3.5
2 級	立向	現地	(A)	C.B	0	1	14	12	12	6	4.2
2 級	下向	工場	(A)	E.D	28	4	1	0	0	2	1.5
2 級	下向	現地	(A)	E.D	13	1	2	8	4	5	3.1
3 級	下向	工場	(C)	D	1	0	0	0	0	17	5.7
3 級	下向	現地	(C)	D	1	0	0	1	1	17	5.6
3 級	下向	工場	(B)	E	11	4	0	0	0	0	1.3
3 級	下向	現地	(B)	E	13	2	0	0	0	0	1.1
3 級	下向	工場	(A)	C.B	8	6	3	2	0	6	2.9
3 級	下向	現地	(A)	C.B	9	9	4	1	0	4	2.5

第 7 表 熔接士級別の欠陥発生に及ぼす影響

熔 接 条 件	熔 接 士 級 別	有意差(危険率%)	備 考
工 場 熔 接	1 : 2	なし	開 先 (A)
	2 : 3	あり (1)	
	1 : 3	なし	
現 地 熔 接	1 : 2	あり (5)	下 向 熔 接
	2 : 3	あり (1)	
	1 : 3	なし	
工 場 熔 接	1 : 2	あり (1)	開 先 (A)
現 地 熔 接	1 : 2	あり (1)	立 向 熔 接

第 8 表 熔接姿勢の欠陥発生に及ぼす影響

熔 接 条 件	熔 接 姿 勢	有意差(危険率%)	備 考
工 場 熔 接	上向 : 立向	あり (1)	開 先 (A)
	立向 : 下向	あり (5)	
	上向 : 下向	あり (1)	
現 地 熔 接	上向 : 立向	なし	1 級 熔 接 士
	立向 : 下向	あり (1)	
	上向 : 下向	あり (1)	

- 熔接姿勢については、(A) 開先、1 級熔接士で調べた結果は、第 8 表のように求まり、工場熔接の立向と下向ではやや差が認められ、上向と下向、上向と立向では差がある。現地熔接では下向と上向、立向との間では、いずれも有意差が認められるが、困難な姿勢である上向と立向の間には有意差が認められない。
- 以上の結果から熔接士の級別、熔接姿勢の相異によって生ずる欠陥等級の差は、第 6 表からわかるように 1 級程度である。強さの判定が X 線等級によって行われるものとする、第 4 表の実験結果を用いて、それぞれの熔接条件の場合の疲れ強さの判定もできることになる。

4. 結 言

熔接条件を種々変えて熔接された突合せ継手について、X 線検査

を行い、各欠陥等級に分類して、平面曲げ疲れ試験を行った結果次のことがわかった。

(1) JISのX線欠陥等級と疲れ強さの関係は第4表のように求まり、2級で10%、3,4級で20%欠陥のため疲れ強さが低下するものとして、継手の疲れの基準強さを見積ればよい。

(2) 工場熔接と現地熔接では、X線検査による欠陥等級は認めにくい、疲れ強さは後者のほうが約10—20%低い。これは熔接環境や熔接条件の相異により、X線検査で判定できない組織やかたさその他の要因による強さの差が生じたものである。

(3) 熔接姿勢は上向、立向、下向の順で欠陥の発生に悪影響をあたえる。熔接士の級別は、熔接環境がわるく、熔接姿勢の困難な場合に欠陥の発生に差を生ずるが、下向で工場熔接の場合にはほとんど差がない。これらの原因による欠陥等級の差は1級程度と考えてよい。

以上は簡単な突合せ熔接継手の平面曲げの実験結果であるが、実物の熔接構造物に対しては、荷重条件、寸法効果、熔接条件を考慮して、欠陥の疲れ強さに及ぼす影響を考えねばならない。その際に、この実験結果が多少とも参考になれば筆者たちの幸いとするところである。

終りに、この研究にご指導をいただいた日立製作所車両事業部矢部満、亀有工場牧正二の両氏ならびにこの研究に協力された各位、実験に協力された当所秋山哲男君に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) Homes: Arcos, 15 (89), 1951 (1938-11)
- (2) M. Hempel: Stahl u. Eisen 58, 756 (1938)
- (3) W. Spraragen: Weld. J. (1942-7)
- (4) 日本造船研究協会報告, 21 (1958-5)



特 許 の 紹 介



特 許 第 268724 号

堂 後 寿 彦・館 下 忠 夫
堀 江 俊 夫

管 内 に 軸 ま た は 管 を 支 持 す る 装 置

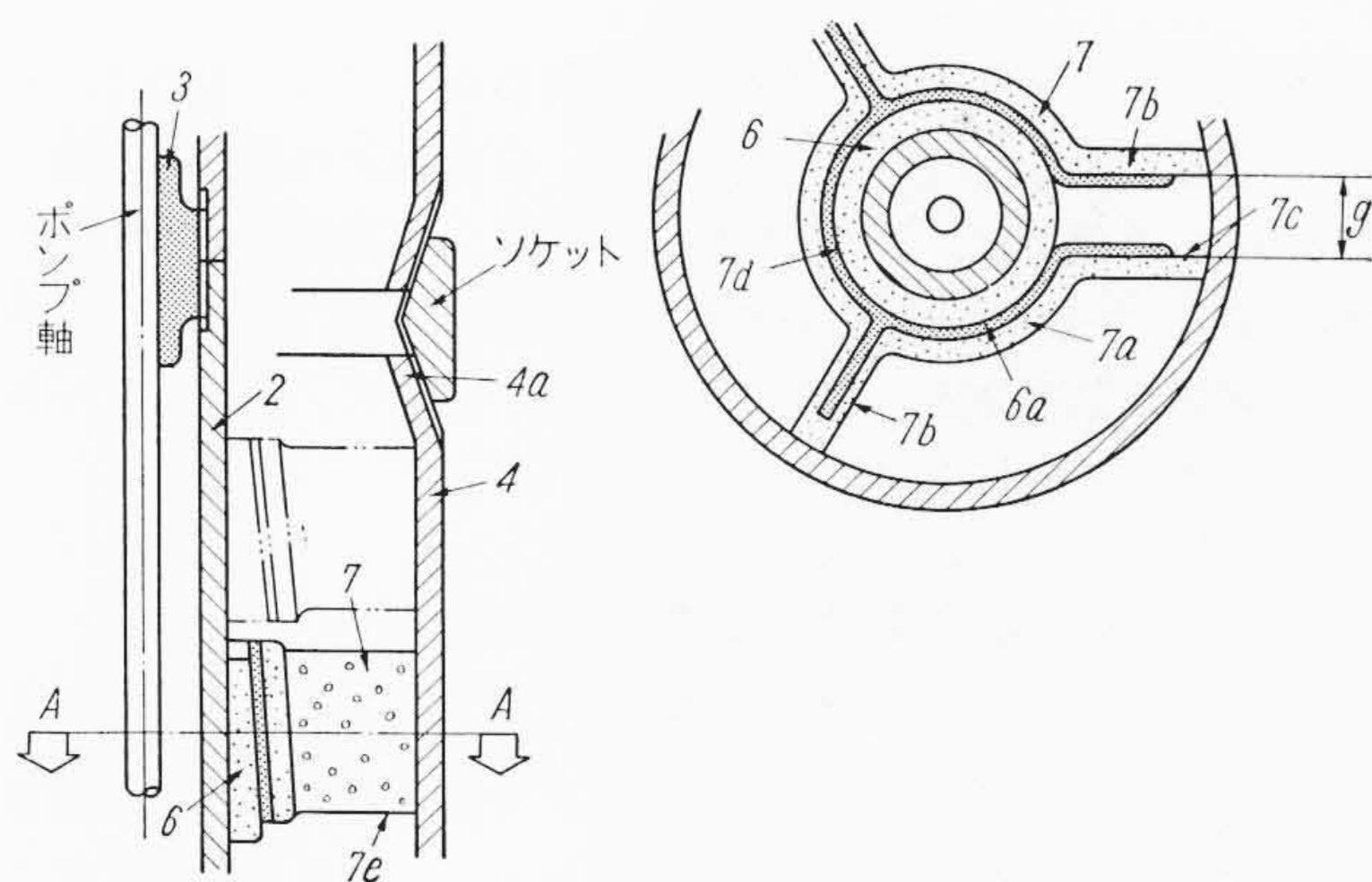
この発明の装置は、深井戸ポンプの保護管支持装置などに適するもので、外周にテーパを設けたゴムスリーブ6と、そのゴムスリーブと一致したテーパ穴を有するボス部7aおよび放射状に形成した支持腕7bをそなえた支持体7とからなり、支持腕の任意のものに切開部7cを設け、支持体のボス部7aの内周および支持腕7bに金属補強板7dを焼付けた構造からできている。

支持体7を揚水管4の端部4aからさし入れるには、まず、支持腕の切開部のすき間gを外力でちぢめることにより各支持腕の外径を揚水管の端部4aの内径よりも小さくし、その状態で揚水管のテーパのなくなるところまで入れてやる(鎖線の状態)。ついで、支持体7を上部から軽くたたきゴムスリーブ6のテーパ部に支持体のボス部をはめこむ。こうすれば、支持体7は、くさび作用によりゴムスリーブの適当な所に固定され、保護管2をよく支持する。

分解の際は、特殊な工具により支持腕の下端面7eを押さえ、前記の鎖線の位置まで支持体7を押し出し、ついで組立ての時と同様に支持腕の切開部のすき間をちぢめることにより支持腕の外径を小さくして支持体7を取り出す。

この発明の装置は、管の小口径側からもさし入れて取付けることができ、その管内の軸または管をよく支持することができる。

(富 田)



Vol. 22

日 立 造 船

技 報

No. 1

目

次

- ◎調質鋼熔接部のき裂伝播特性に関する研究
- ◎逆ひずみ、拘束速度と角変形および薄板における変形について
- ◎直交異方性板理論による道路橋鋼床板の実験的研究
- ◎鋼材切削における正面フライスカッタの工具寿命について

- ◎テレモータの性能に関する実験的研究
- ◎原油および重油の放射線損傷の研究
- ◎高圧水門扉に加わる水圧力に関する実験的研究
- ◎船体部原図配管法について
- ◎ルルギ Dewight-Lloyed 焼結機について

本誌につきましてのご照会は下記発行所へお願いいたします。

日立造船株式会社技術研究所

大阪市此花区桜島北之町