

土木研究所資料 第2149号

鋼床版トラフ形縦リブ溶接継手の疲労試験 (I) 継手形式の選定

昭和59年11月

建設省土木研究所
構造橋梁部橋梁研究室

Copyright © 1984 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

鋼床版トラフ形縦リブ溶接継手の疲労試験

(I) 継手形式の選定

橋梁研究室 佐伯 彰一
西川 和廣
滝沢 晃

要 旨

近年、長大橋を中心として使用例が増加している鋼床版では、直接輪荷重による影響を受けるので疲労に対する考慮が必要である。しかし、トラフリブのように閉断面となる縦リブの現場溶接継手については、継手形式、施工条件、疲労強度など、必ずしも明らかにされていない。本試験は、以上のうち疲労強度上望ましい溶接継手の形式について明らかにするため、4種20体の供試体による疲労試験を行い、2種の突合せ溶接による継手形式が疲労強度上優れていることを示した。

キーワード：現場溶接継手、疲労試験、継手形式(構造)、鋼床版、トラフ(U)リブ

ま え が き

近年、長大橋の床構造として鋼床版を用いることが多くなっている。RC床版に比べ死荷重を軽減できることが鋼床版のメリットであるが、鋼床版では輪荷重の影響を直接受けること、溶接継手を多く含むことなどの理由により、疲労による影響を受け易い。このため、道路橋示方書では、鋼床版については疲労の照査が必要であることを規定し、一般的な溶接継手の疲労に対する許容応力度を示している。

初期の鋼床版では、平鋼やバルブプレートなどの開断面部材を縦リブとして用いていたが、近年では、U形断面部材を用いて閉断面リブとした方が鋼重の軽減となるため、U断面リブ（トラフリブ）の採用例が増加している。しかし、縦リブを閉断面とすることにより、縦リブの現場における溶接方法について新たな問題が生じており、継手の施工方法および継手の疲労強度について明らかにする必要がある。

鋼床版トラフリブの現場における接合方法としては、溶接による方法と高力ボルト摩擦接合による方法が考えられるが、連結板やボルトによる鋼重の増加や外観の配慮から現場溶接継手とする例が多い。このことから本試験調査では、鋼床版トラフ形縦リブの現場溶接継手として望ましい継手構造を明らかにするため、4種20体の供試体を製作して疲労試験を行い、それらのうち2種の突合せ溶接継手形式が疲労強度の面で優れていることを明らかにした。

また、疲労に関する許容応力度の設定に関連して、従来参考にされてきた、日本鋼構造協会疲労設計指針（案）に示された疲労試験データから、疲労クラックの発生時期を推定する方法は、必ずしも合理的でない点についても指摘した。

昭和59年11月

建設省土木研究所

構造橋梁部 橋梁研究室

室長 佐伯 彰 一

研究員 西川 和 廣

滝 沢 晃

目 次

ま え が き

1. 試験概要	1
1.1 目 的	1
1.2 鋼床版トラフリブの現場継手について	1
1.3 供 試 体	1
1.4 試験方法	2
2. 静的試験結果	5
3. 疲労試験結果	8
3.1 破断性状	8
3.2 破断繰返し载荷回数 N_F	8
3.3 基準疲労強度の算出	9
4. 疲労クラック発生繰返し载荷回数 N_c の推定	14
4.1 推定方法	14
4.2 日本鋼構造協会疲労設計指針（案）による方法との比較	14
5. 結 論	36
あ と が き	37

1. 試 験 概 要

1.1 目 的

本試験は、鋼床版トラフリブの現場溶接継手として、どのような継手形式が疲労強度上有利であるかについて調べることを目的としている。また、同時に許容応力度（範囲）の設定上重要である、疲労クラック発生繰返し载荷回数 N_c の推定法についても検討を加える。

1.2 鋼床版トラフリブの現場継手について

鋼床版トラフリブの現場継手としては、溶接による方法と高力ボルトによる方法が考えられる。従来、現場継手部がもっとも疲労に対し厳しい条件下にあること、現場溶接の実績が少ないことなどの理由からボルト継手とする場合があったが、高力ボルトや連結版による鋼重の増加、ボルトの施工を行うためのハンドホルの必要性およびそれによる断面欠損や耐食性の問題、外観などの点から、現場溶接による施工が一般的になってきている。

溶接とした場合の継手形式としては種々考えられているが、最適な形式は見出されておらず、疲労強度や施工性等の試験および調査を行って決定する必要がある。

1.3 供 試 体

供試体の全体形状および寸法は図—1.1に示す通りであり、トラフリブとデッキプレートから成る梁状の供試体である。供試体の中央でリブを分割し、この部分を試験継手とした。

継手の形式は図—1.2に図す4種とし、それぞれ5体ずつ、計20体製作した。4種の継手形式は以下に述べる通りである。

- | | |
|--------|--|
| TYPE—A | リブと同板厚（6mm）の裏当て金を用いた突合せ溶接継手 |
| TYPE—B | 板厚12mmのダイヤフラムを挿入し、これを裏当て金として用いた突合せ溶接継手 |
| TYPE—C | トラフ断面より大きな鋼板を開先をとったリブではさみ両側を突合せ溶接したもの |
| TYPE—E | Dと同様に鋼板をはさんで前面すみ肉溶接したもの |

Aは最も一般的なタイプでありすでに使用された例も多い。Bはダイヤフラムを挿入することによりリブ形状の変形を防ぎ、部材の組立て精度を高めようとするものであるが、拘束による溶接われが心配される。DおよびEは施工の簡便さをねらったものであるが、溶接線が2本となるため欠陥の発生、熱影響、残留応力などの面で若干不利になることが予想される。とくにEは、応力を伝達する前面すみ肉溶接となるため、示方書の規定を満足しないが、すみ肉溶接のサイズを大きくすることで対処が可能かどうか検討の対象とした。

以上の他、当初TYPE—Cとして幅50mm程度、厚さ6mmの鋼板をリブの外側にあて、両側をすみ肉溶接とする方法も考えていたが、強度が低いことが明らかであるので対象からはずすことにした。

供試体はすべて工場内において理想的な条件下で製作された。したがって、現場における諸条件については考慮されていない。この点については、次回以降の試験により検討する。

供試体に使用した鋼材はすべて S S 41 材とした。薄い板では一般に降伏点が高い場合が多いので、今回は、市場に出回っているものの中から、極力降伏点の低いものを選んで使用した。素材の引張試験結果を表 1.1 に示す。

1.4 試験方法

載荷試験は、以下に述べる条件下で行った。

(1) 載荷方法

両端単純支持とし、図 1.3 に示すように 2 点載荷による曲げ試験とした。

(2) 荷 重

供試体の“あばれ”を防ぐため、下限荷重を 1 ton とした片振載荷とした。波形は正弦波、載荷速度は 3 Hz とした。

(3) 測定項目

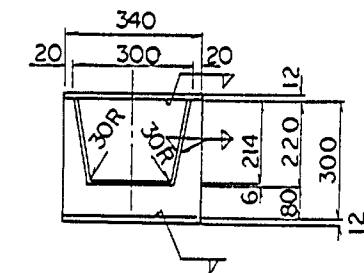
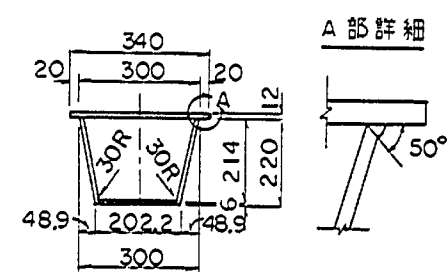
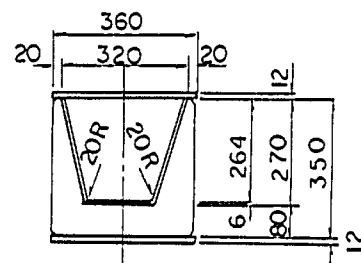
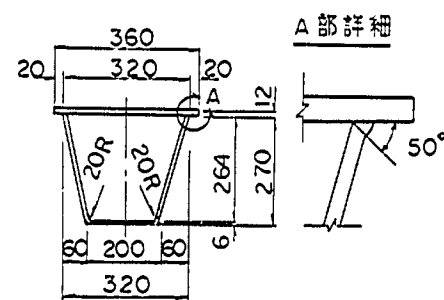
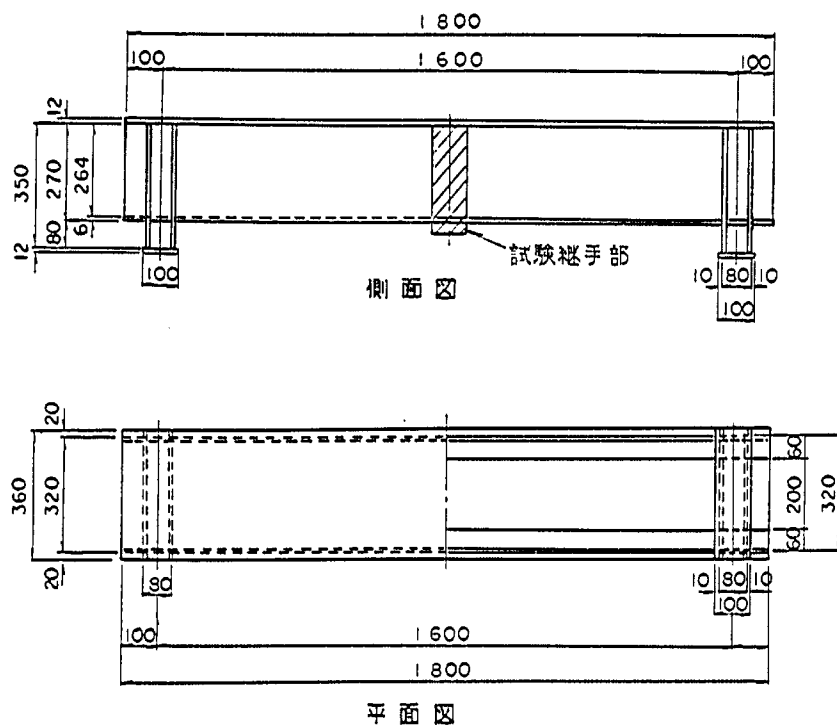
継手周辺のひずみ分布を疲労試験開始前にひずみゲージにより測定、その後 20 万回ごとに試験機を止め、静的載荷を行って測定した（ひずみの測定点は 2 および 4 章を参照のこと）。

また、染色侵透探傷法（カラーチェック）により表面での疲労クラックの観察を行った。

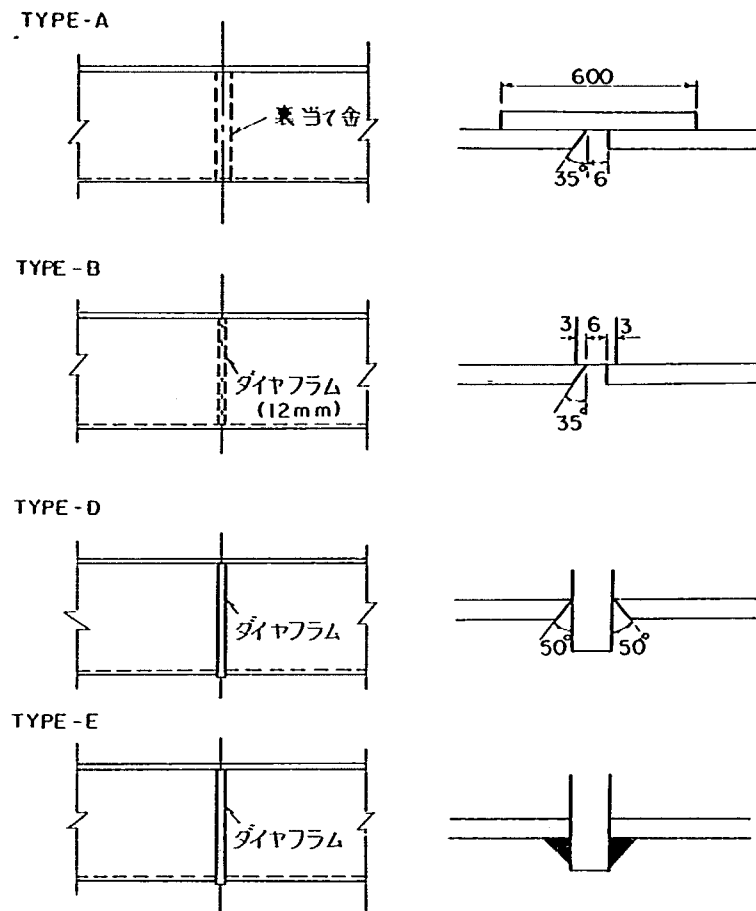
使用した疲労試験機は主として 200 / 150 ton 疲労試験機で、40 ton 実働荷重疲労試験機（動的 27 ton）および構造物繰返し載荷装置（動的 50 ton）も合わせて使用した。

表 1.1 鋼材の引張試験結果

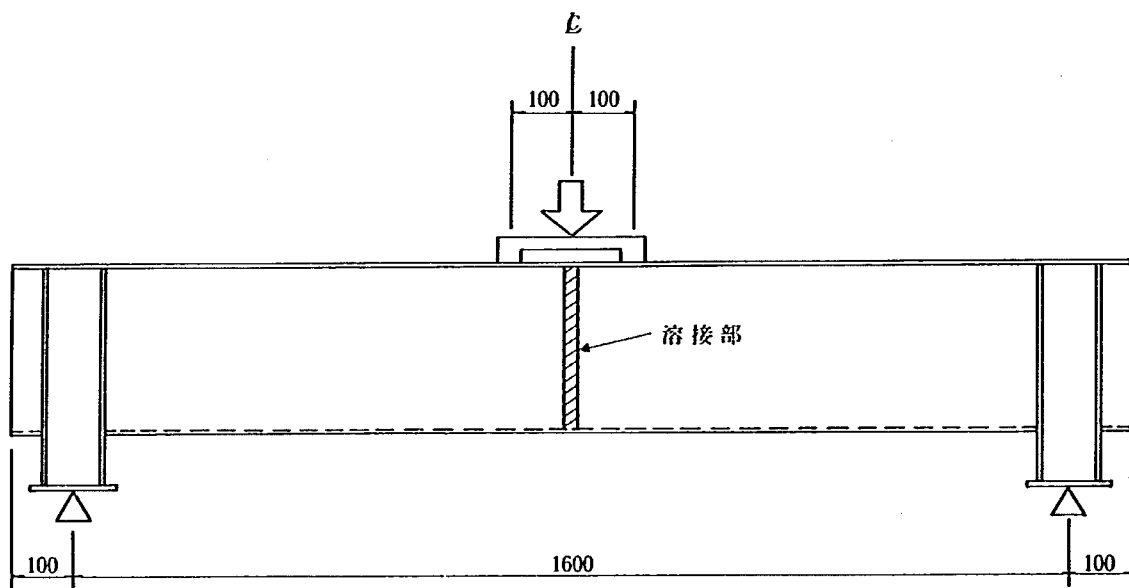
材 質		番 号	降 状 点		引 張 強 さ		伸 び (%)	板 厚 (mm)
			荷重(kg)	応力(kg/mm ²)	荷重(kg)	応力(kg/mm ²)		
S S 4 1	デ ッキ プ レ ー ト	1	13,600	28.90	21,050	44.70	29	12
		2	13,400	28.60	20,800	44.40	29	12
		3	13,600	28.20	21,000	43.50	29	12
	縦 リ ブ	1	7,660	33.20	10,000	42.70	26	6
		2	7,900	34.60	10,400	45.60	26	6
		3	7,900	32.90	10,400	43.30	32	6



図一 1.1 供試体の形状・寸法



図一 1.2 継手の形状



図一 1.3 载荷方法

2. 静的試験結果

Bタイプの一休目の供試体について、図一2.1に示すようにひずみゲージを多く貼付し、静的荷重試験を行った。測定されたひずみ分布を図一2.2および図2.3に示す。

図一2.2は、供試体中央における支間方向のひずみ分布を示したもので、計算値との比較のため、応力に換算して表示してある。計算値は単純梁として計算したものである。リブの底面での測定値は計算値とよく一致しているが、デッキプレート上でのひずみ分布には、荷重点付近でかなりの乱れが観察された。

図一2.3は、リブ断面におけるひずみ分布を示したものである。図一2.2から予想されたように、荷重点付近のデッキプレート上のひずみ分布に大きな乱れがみられる。測定されたひずみのばらつきや、荷重点や支点における不陸の影響もあると思われるが、ダイヤフラムの存在の影響が大きいものと考えられる。

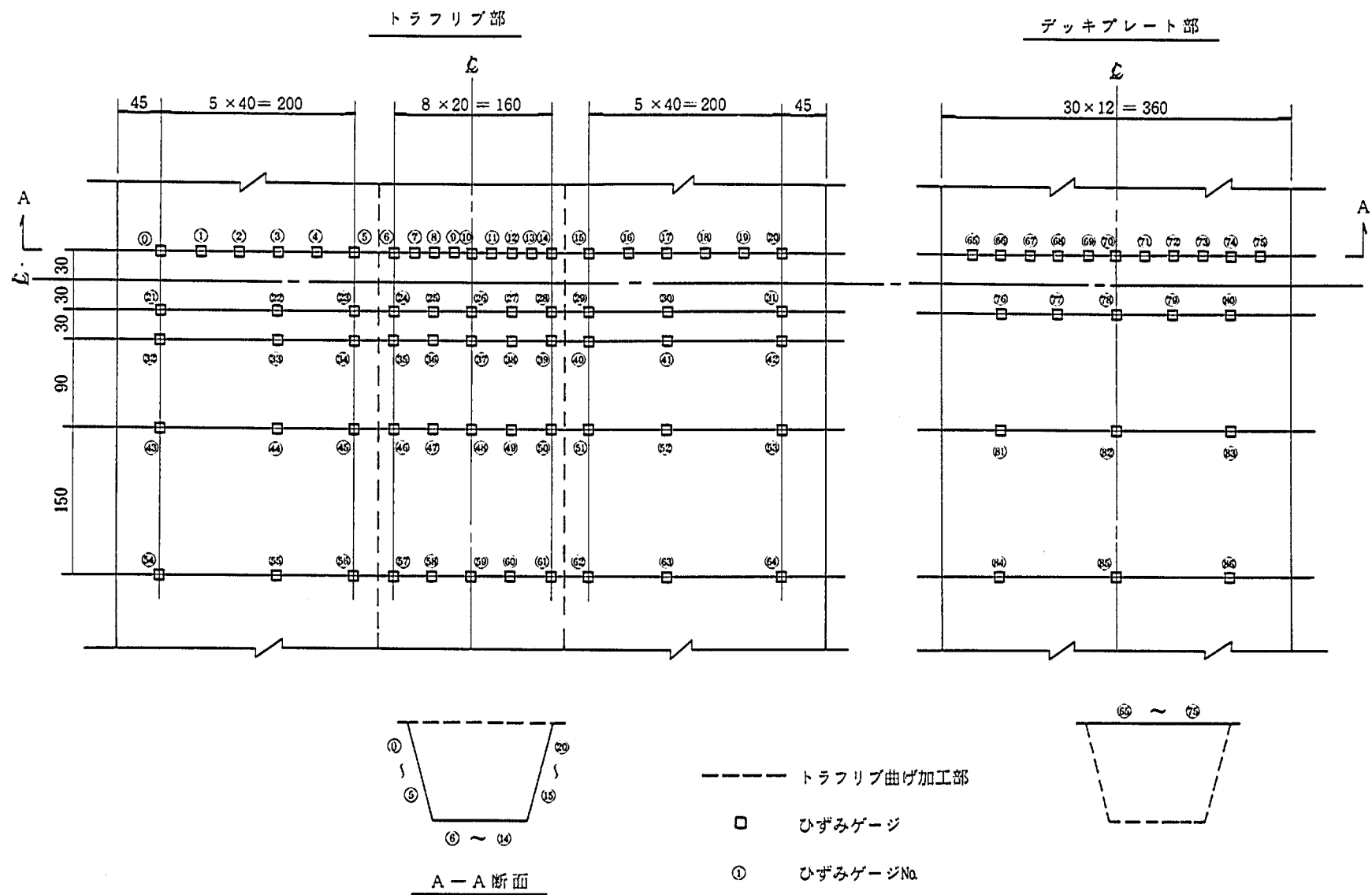
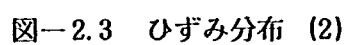
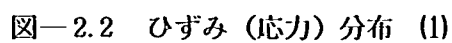


図-2.1 ひずみゲージ貼り付け位置 (TYPE-B-1)



3. 疲労試験結果

3.1 破断性状

供試体のタイプによる、クラックの発生や破断性状の差は次に述べる通りである。

(1) TYPE-A

破断につながるクラックは、破面の観察による限り、トラフリブ曲げ加工部の突合せ溶接ルート部から発生している。曲げ加工部以外にもクラックの発生、進展の形跡は見られるが、規模は小さい。また、表面の溶接止端部から発生したクラックもあったが、破断には直接つながらなかった。

(2) TYPE-B

基本的にはTYPE-Aと同様である。一例のみ、底面中央付近のルート部からクラックが発生し、破断に至った。曲げ加工部からのクラック発生一破断例を写真— 3.1 および 2 に示す。

(3) TYPE-D

すべて、溶接ルート部からのクラックが発生している。2つの溶接線から同時にクラックを発生した例もある（写真— 3.2 参照）。

(4) TYPE-E

ルート部からクラックを発生して破断したものと余盛止端の凹凸部から破断したものとに分けられる。

3.2 破断繰返し载荷回数 N_f

疲労試験は、疲労きれつが発生、進展して最大荷重を支持し得なくなったところで中止し、その時点破断回数 N_f と定義した。トラフリブ底面における応力範囲 σ_R （荷重からの計算値）と N_f の関係を表— 3.1 および図— 3.1 に示す。

TYPE-AおよびBは比較的ばらつきが小さく、ほぼ一つの直線上に整理されるが、TYPE-DおよびEではばらつきが大きく、強度も前の2タイプに比べてかなり低い。TYPE-Eについては前面すみ肉という疲労強度上不利な形式であるため、当初から予想された結果である。TYPE-Dの強度が低く、ばらつきが大きかったのは、この継手形式が片側から裏当て材を用いることなく全面溶込みをねらった溶接であることから、トラフ内側の裏ビード形状に不整が生じ易かったこと、および溶接線が2本になるため欠陥が生じる確率が高かったこと、あるいは残留応力が大きかったことなどが主な原因として考えられる。いずれにしても、TYPE-DおよびEの継手形式は、鋼床版トラフリブの現場溶接継手には適していないことは明らかである。

TYPE-AおよびBについて、最小2乗法によりそれぞれの σ_R — N_f 線を求めると次のようになる。

$$\text{TYPE-A} \quad \sigma_f = 1.75 \times 10^4 \times N_f^{-0.186} \quad (1)$$

$$\text{TYPE-B} \quad \sigma_f = 1.62 \times 10^4 \times N_f^{-0.178} \quad (2)$$

(1)、(2)式から200万回における応力範囲を求めると、その差は約50kg/cm²と小さい。したがって、この2

タイプについては施工の容易さあるいは確実さなど、他の要因により選択するのが適当と考えられる。

3.3 基準疲労強度の算出

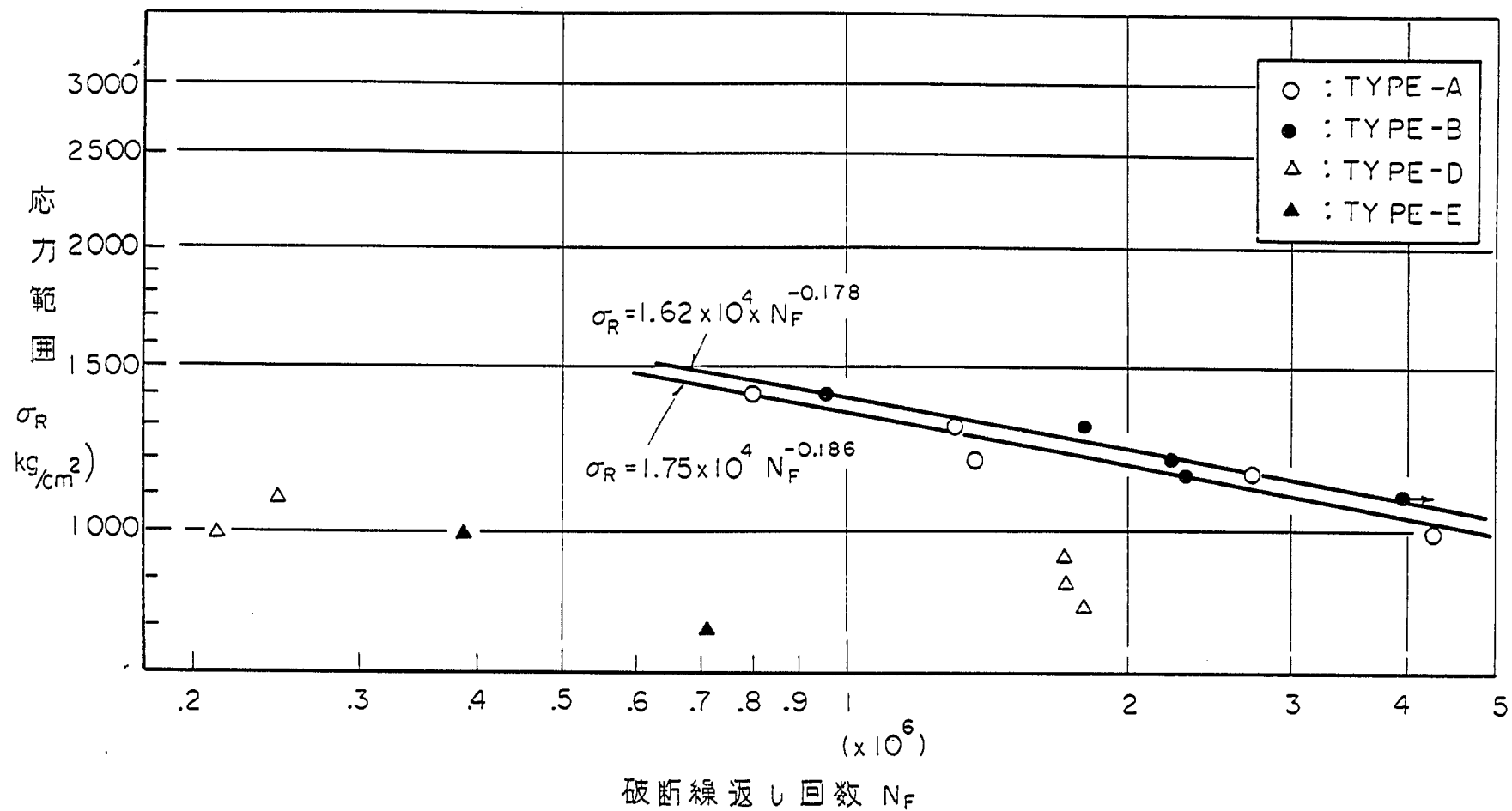
道路橋示方書Ⅱ鋼橋編では、鋼床版の設計における疲労を考慮した許容応力範囲を定めているが、これは土木研究所で実施された疲労試験結果に基づき、日本鋼構造協会疲労設計指針⁽¹⁾に示される方法に従って算出されたものである。同指針に示される許容応力範囲の算出法の概略を以下に示す（図－3.2参照）。

- 1) 対象とする継手（あるいは母材）の疲労試験結果の σ_r と N_F の関係を両対数グラフに整理し、式(1)や(2)のように指数関数（あるいは対数関数）に近似する。
- 2) データのばらつきを考慮して95%信頼限界線を求め、200万回に相当する応力範囲を100万回疲労きれつ発生強度と定義し、基本疲労強度と称する。
- 3) 基本強度をもとに、 σ_r と N_c の関係を対数グラフ上で－0.18の傾きをもつ直線と仮定し、供用年数内における繰返し数、構造物の重要度、応力比などを勘案して許容応力範囲を求める。

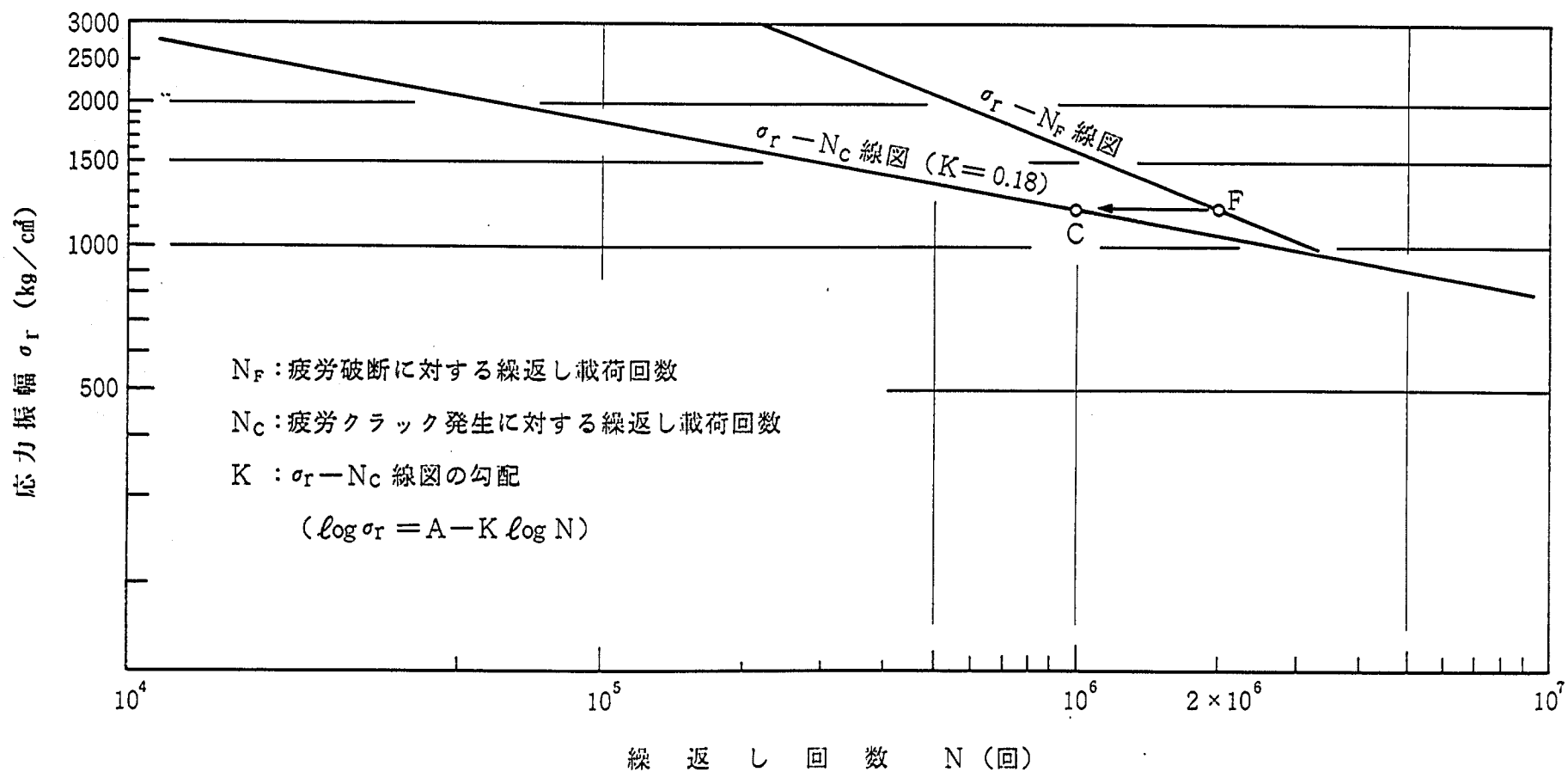
同指針は、既往の疲労試験結果に基づき、継手をAからGまで8つの等級に分けて基本疲労強度(提案値)を示しているが、今回の試験結果から1) および2) に従って基本疲労強度を計算すると、TYPE-Aでは1,108 kg/cm²、Bでは1,177 kg/cm²となり、止端部を仕上げしないリブ十字すみ肉溶接継手と同じD等級(1,000 kg/cm²)に分類される。

表－3.1 疲労試験結果

タイプ	供試体 No	応力範囲 σ_R (kg/cm ²)	クラック発見 (回)	破 断 N_F (回)
A	1	1,000	—	4,240,000
	5	1,150	—	2,716,930
	4	1,200	1,300,000	1,370,840
	3	1,300	1,095,780	1,317,260
	2	1,400	240,000	794,000
B	5	1,100	—	破断せず
	4	1,150	900,000	2,301,400
	2	1,200	2,200,000	2,260,000
	1	1,300	—	1,800,000
	3	1,400	455,700	949,310
C	5	850	1,400,000	1,815,960
	2	900	1,400,000	1,735,510
	4	950	963,000	1,715,430
	1	1,000	—	212,330
	3	1,100	—	246,960
D	2	800	670,000	717,240
	1	1,000	—	391,530
	3	—	—	—
	4	—	—	—
	5	—	—	—



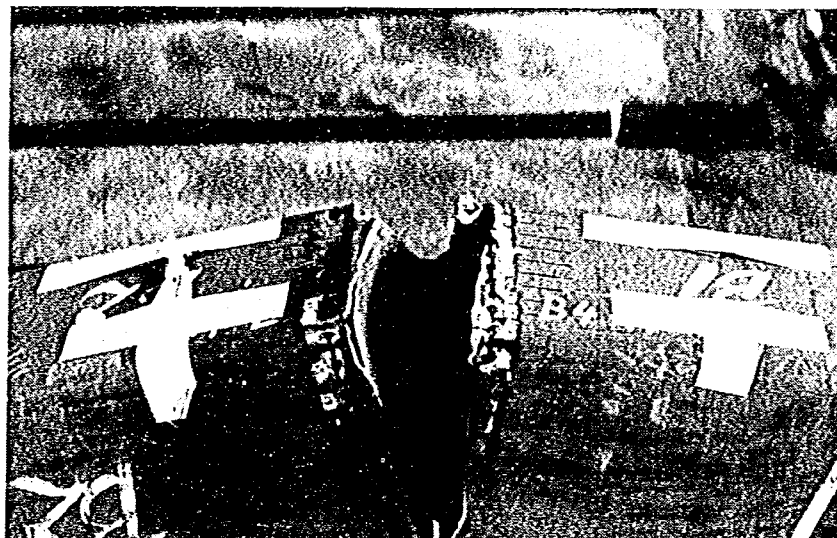
図—3.1 疲労試験結果



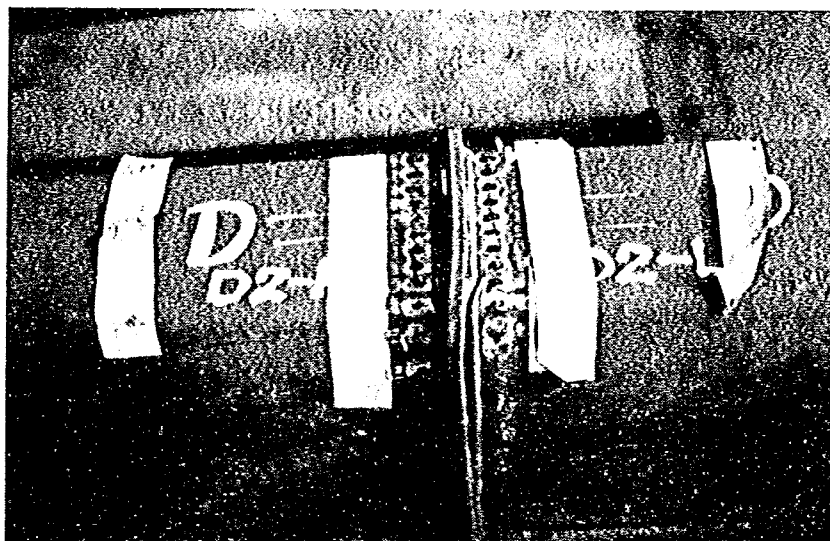
図—3.2 $\sigma_r - N_C$ 線図の推定方法



写真—3.1 クラック発生—破断例



写真—3.2 クラック発生—破断例



写真－3.3 クラック発生－破断例

4. 疲労クラック発生繰返し载荷回数 N_c の推定

4.1 推定方法

道路橋では、疲労設計を行う場合、200万回の等価荷重繰返し^{*}に対して疲労クラックが発生しないことを前提としているが、溶接継手の疲労試験を行って N_c と応力範囲の関係を明らかにした例は、現状ではまだ見ることができない。既往の研究に見られる N_c に関する試験結果は、ほとんどが平滑材か簡単な切欠を有する試験片によるもので、疲労きれつが表面から発生するのを目視により確認したものであり、前述の日本鋼構造協会疲労設計指針（案）でも、このような試験結果に基づいて N_c に関する規定を設けている。

一般に、切欠きを有する試験片の疲労試験を行った場合、切欠きの応力集中率が高い程 N_F に対する N_c の割合が小さくなる。このことは、応力集中率が大きければ大きい程疲労クラックの発生が早くなるのに対し、クラックの進展速度はクラック先端の応力場の大きさに支配され、クラックがある程度成長した後は応力集中の影響がほとんどなくなってしまうことを考えれば容易に理解できよう。

溶接継手、とくに現場溶接継手を考えた場合、溶接欠陥を皆無とすることは困難であり、また欠陥の形状によってはクラックに近いような大きい応力集中率を有することも十分考えられる。したがって、平滑あるいは比較的緩い形状の切欠き試験片のデータに基づいて定められた指針（案）は、危険側の設計となる可能性がある。

このようなことから、今回の試験において以下の方法で N_c の推定を試みることにした。

- 1) 継手周辺に、図—4.1に示すようにひずみゲージを密に貼り付ける。
- 2) 疲労試験開始後、適宜試験機を停止し、静的に载荷してひずみを測定する。
- 3) 試験終了後、測定したひずみ分布を図化し、クラックの発生によって応力の再配分が行われ明らかに分布形状が変化した時点を疲労クラック発生時とする。

図—4.2は、ある供試体における、リブ底面における応力分布の変化を示したものである。この場合、 $N = 6 \times 10^5$ から両端付近のひずみ分布形状が変化し始めているのがわかるので、 $N_c = 6 \times 10^5$ とする。応力分布に影響が現われる時点では、クラックはかなりの大きさに成長しているものと予想されるので、真の N_c は 6×10^5 回よりかなり小さいものと考えられる。

N_c の推定結果を表—4.1に、推定に使用した応力分布図を図—4.3～19に示す。

4.2 日本鋼構造協会疲労設計指針（案）による方法との比較

TYPE—Aについて N_c を推定した結果を図—4.20に示す。矢印付きの記号で示したのは、 N_c はひずみ測定時よりも少なくとも前であることを意味している。図中には、 $\sigma_r - N_c$ 線の傾きを -0.18 とした設計指針（案）による N_c 推定線を示してある。一見試験結果と一致しているような印象を与えるが、ひずみゲージの貼り付け間隔やきれつが発生するであろうと思われる位置との距離、板厚などを考慮すると、推定の時点で疲労きれつはすでにかかなりの大きさ（板厚は貫通しないまでも溶接線方向には）になっていると考えざるを得ず、本来の意味での N_c は、図に示したよりもずっと小さい値である可能性が高い。

以上のように、ひずみゲージによる N_c は精度にはかなり問題があるものの、少なくとも N_c を基準とした疲労設計をするには、前出の推針は場合によっては危険側となる可能性があることは、確認できたものと考えられる。

表一4.1 N の推定結果

タイプ	供試体 No	応力範囲 σ_R (kg/cm ²)	クラック推定 (回)	クラック発見 (回)
A	1	1,000	—	—
	5	1,150	1,400,000	—
	4	1,200	700,000	1,300,000
	3	1,300	800,000	1,095,780
	2	1,400	200,000	240,000
B	5	1,100	破断なし	
	4	1,150	900,000	900,000
	2	1,200	1,600,000	2,200,000
	1	1,300	1,110,000	—
	3	1,400	300,000	455,700
C	5	850	900,000	1,400,000
	2	900	1,200,000	1,400,000
	4	950	700,000	963,000
	1	1,000	70,000	—
	3	1,100	200,000	—
D	2	800	400,000	670,000
	1	1,000	200,000	—
	3	—	—	—
	4	—	—	—
	5	—	—	—

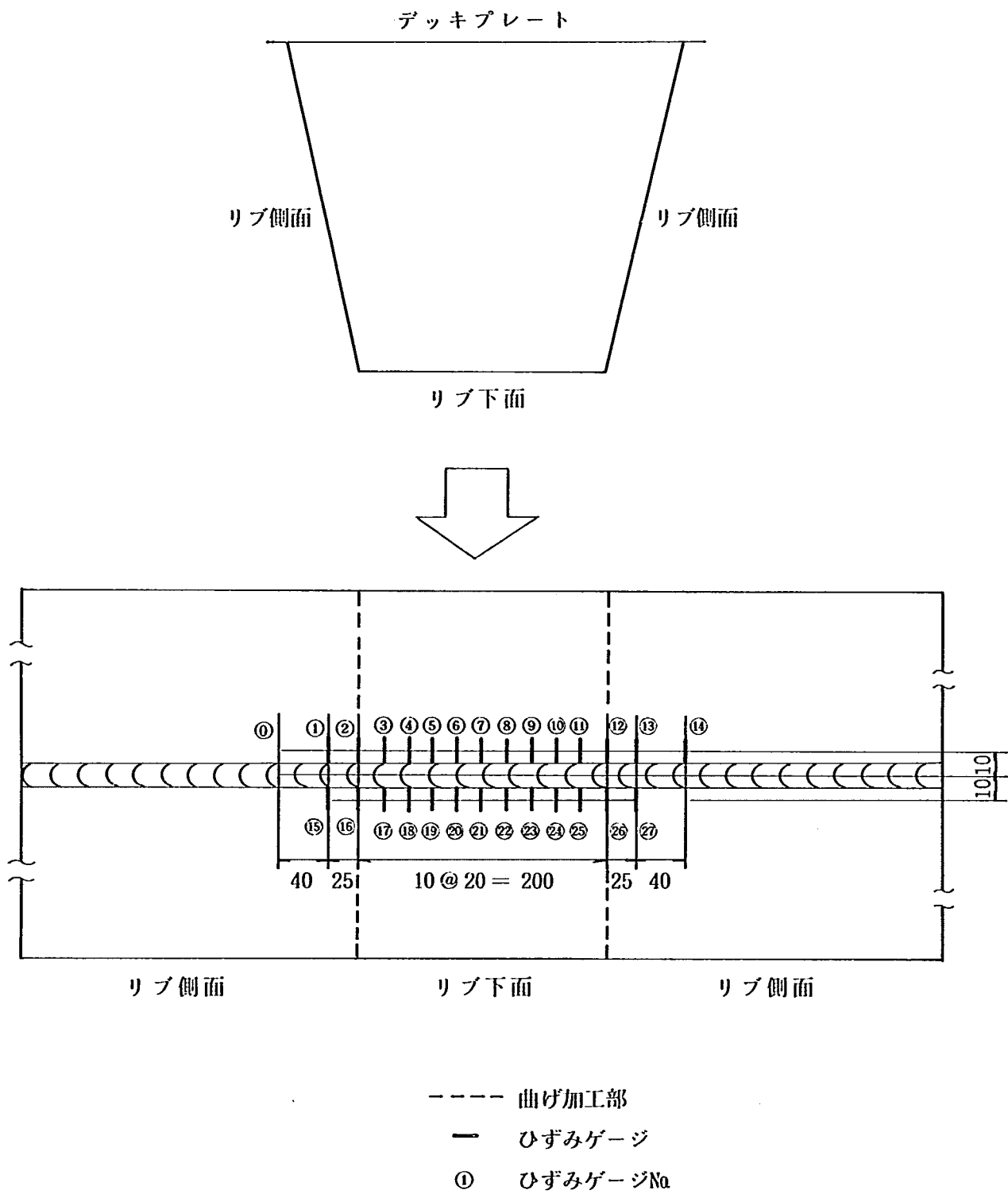
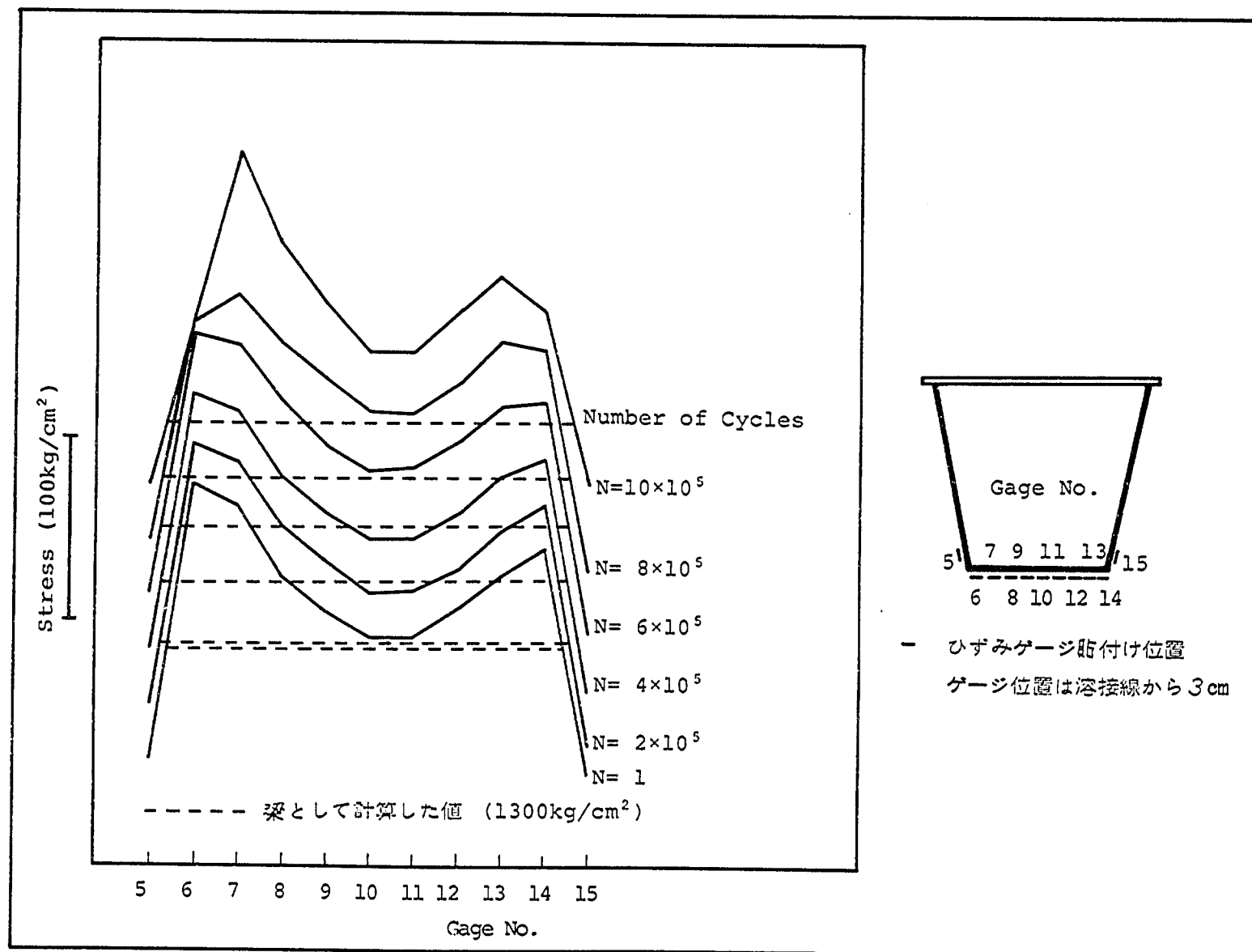
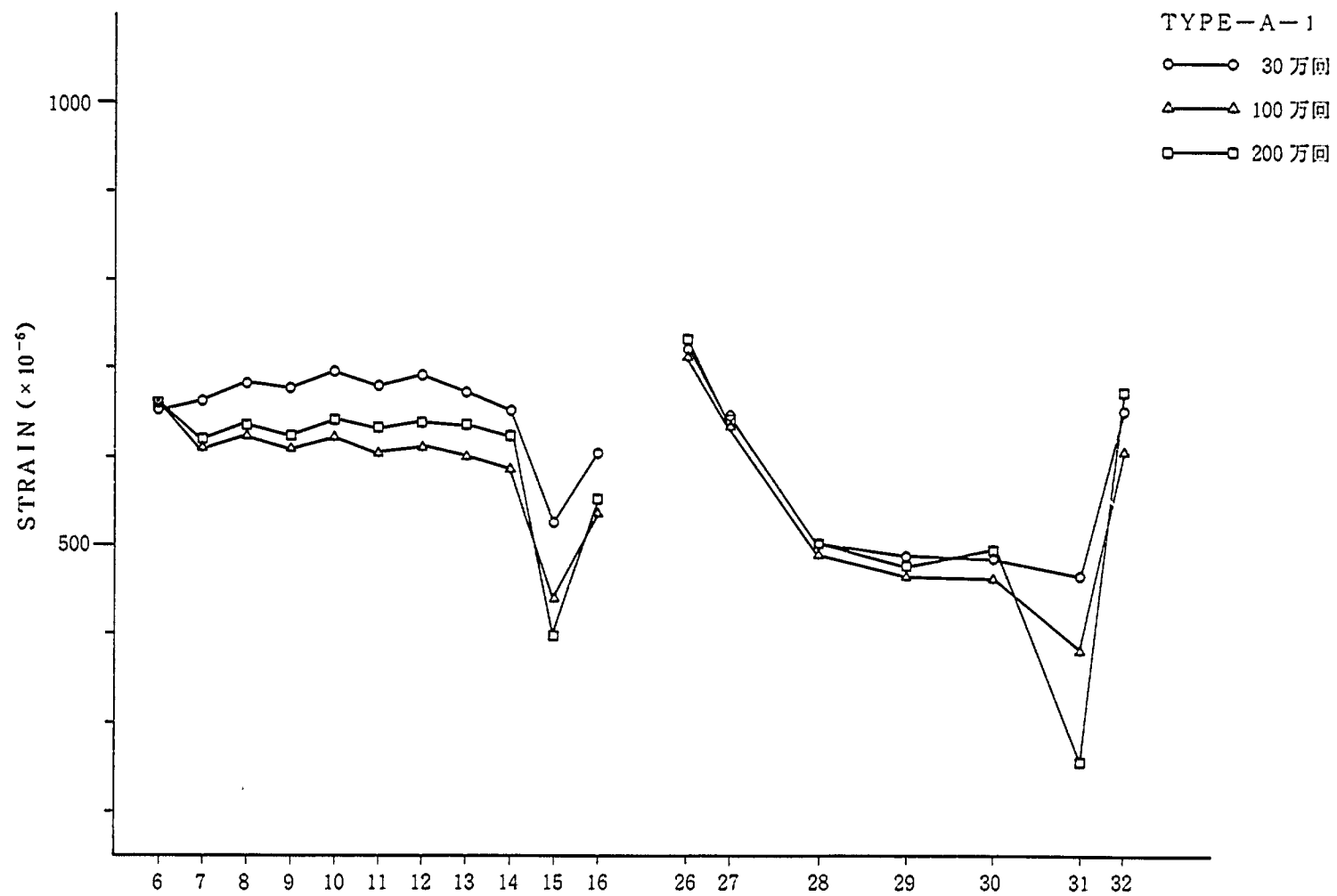


図-4.1 ひずみゲージ貼り付け位置



図—4.2 リブ底面の応力分布



图—4.3 应力分布图

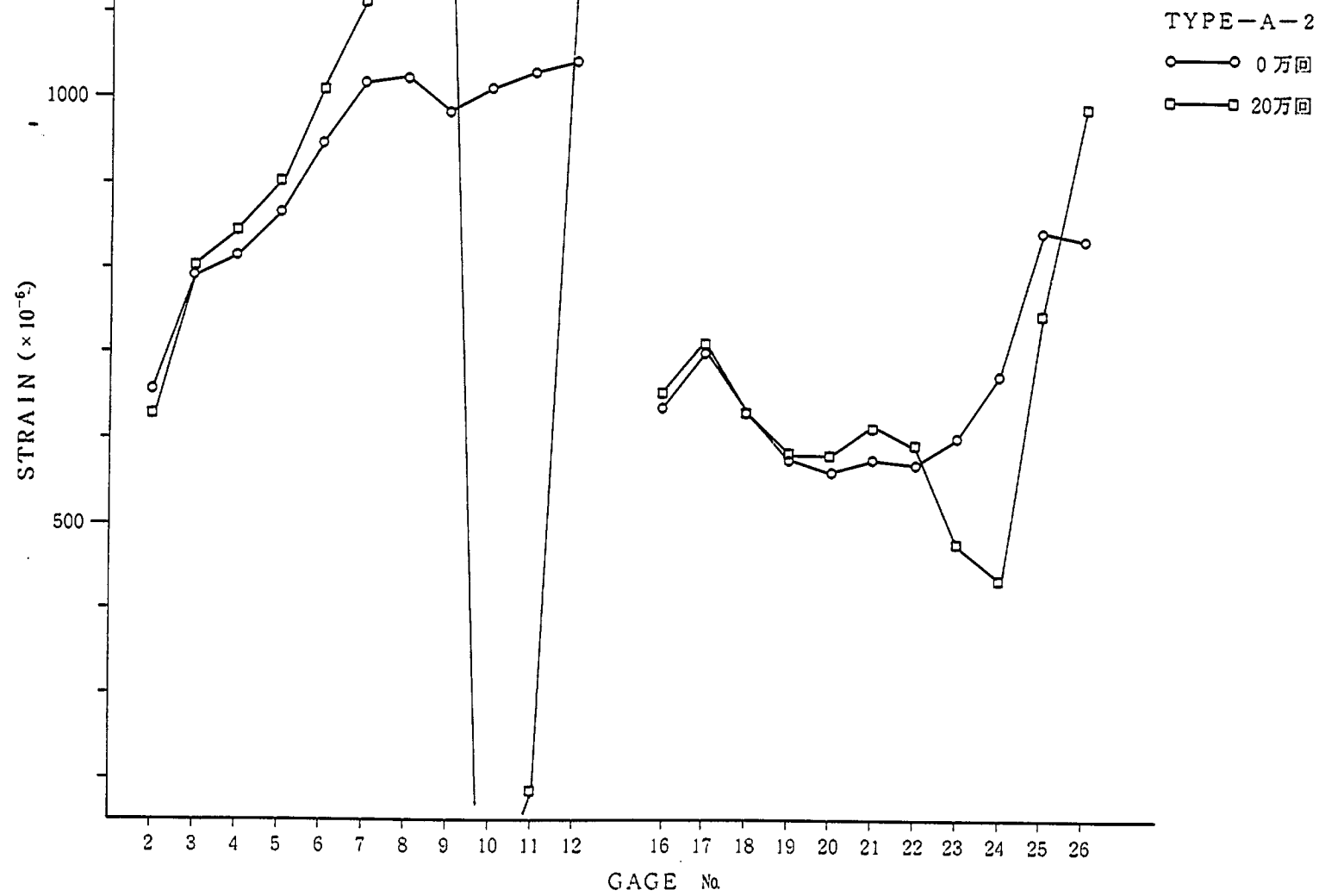
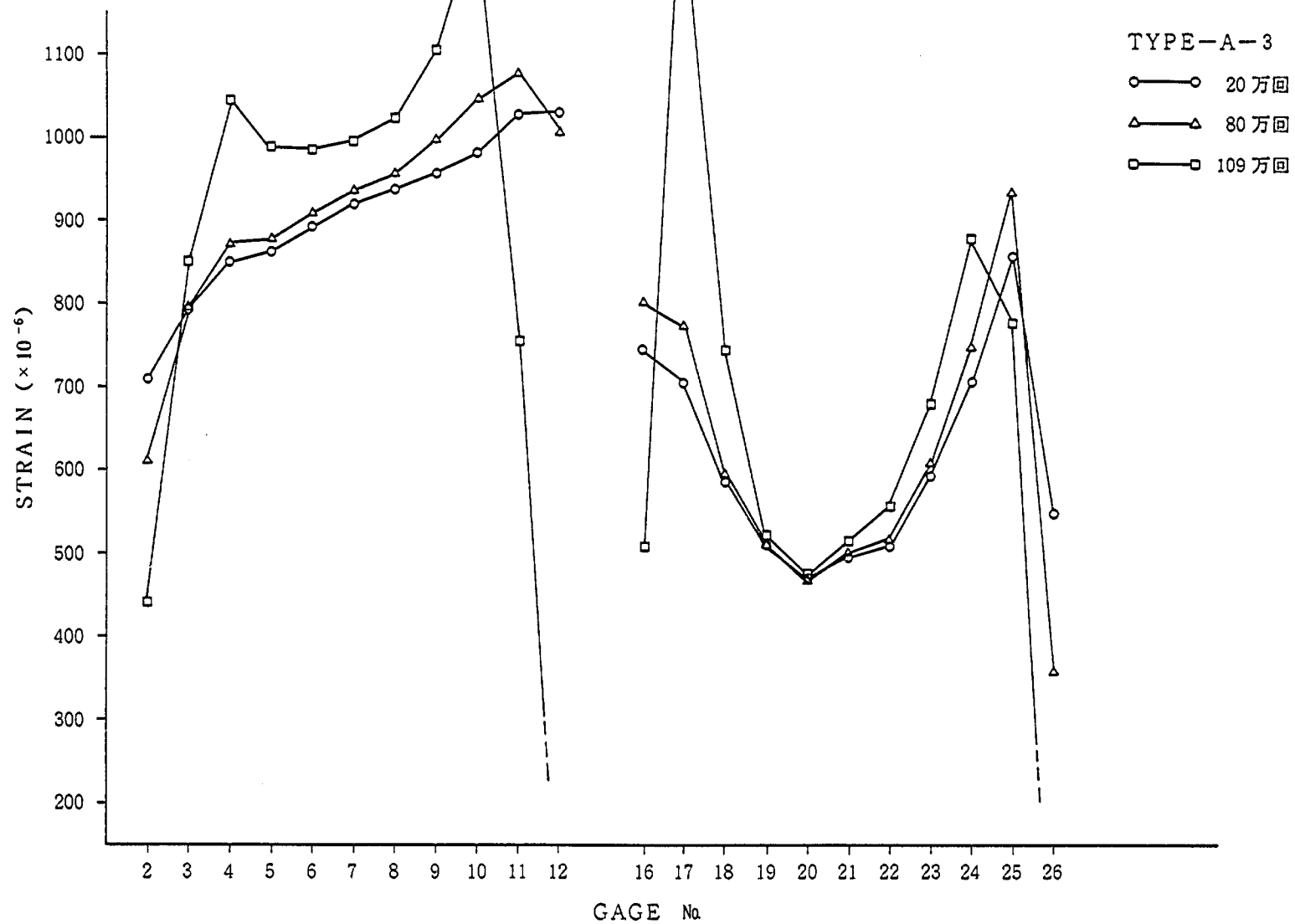


图-4.4 应力分布图



图—4.5 应力分布图

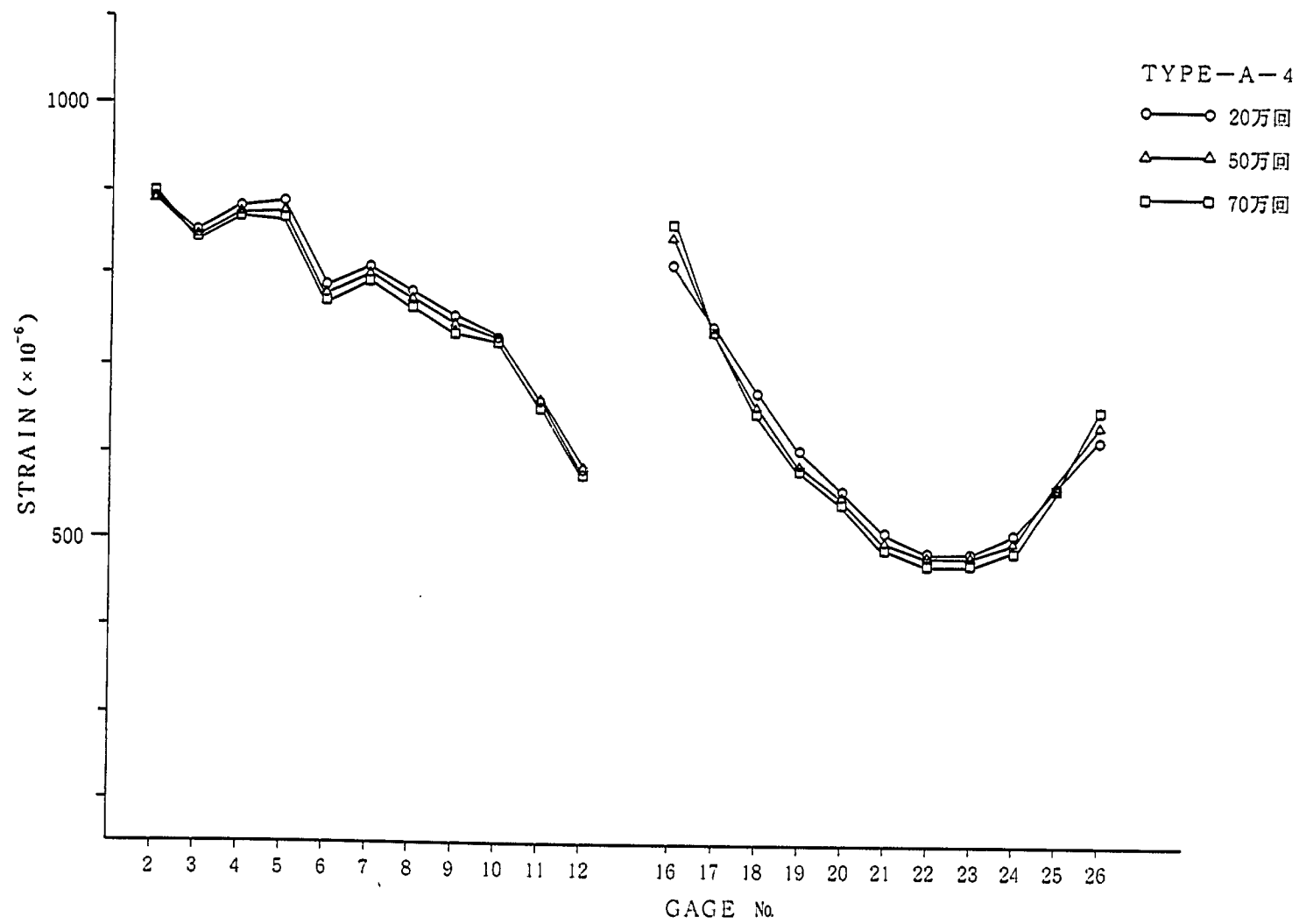
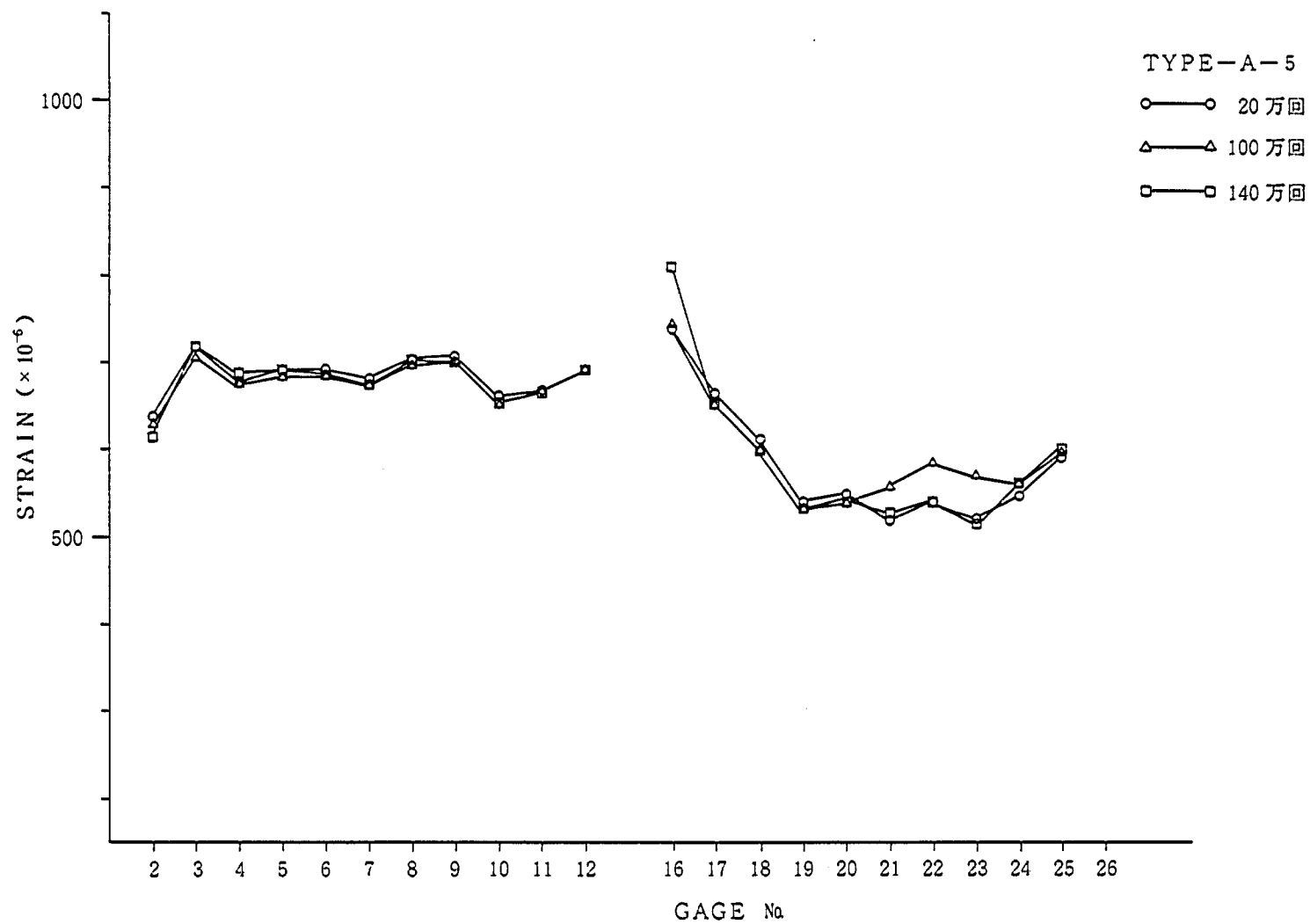
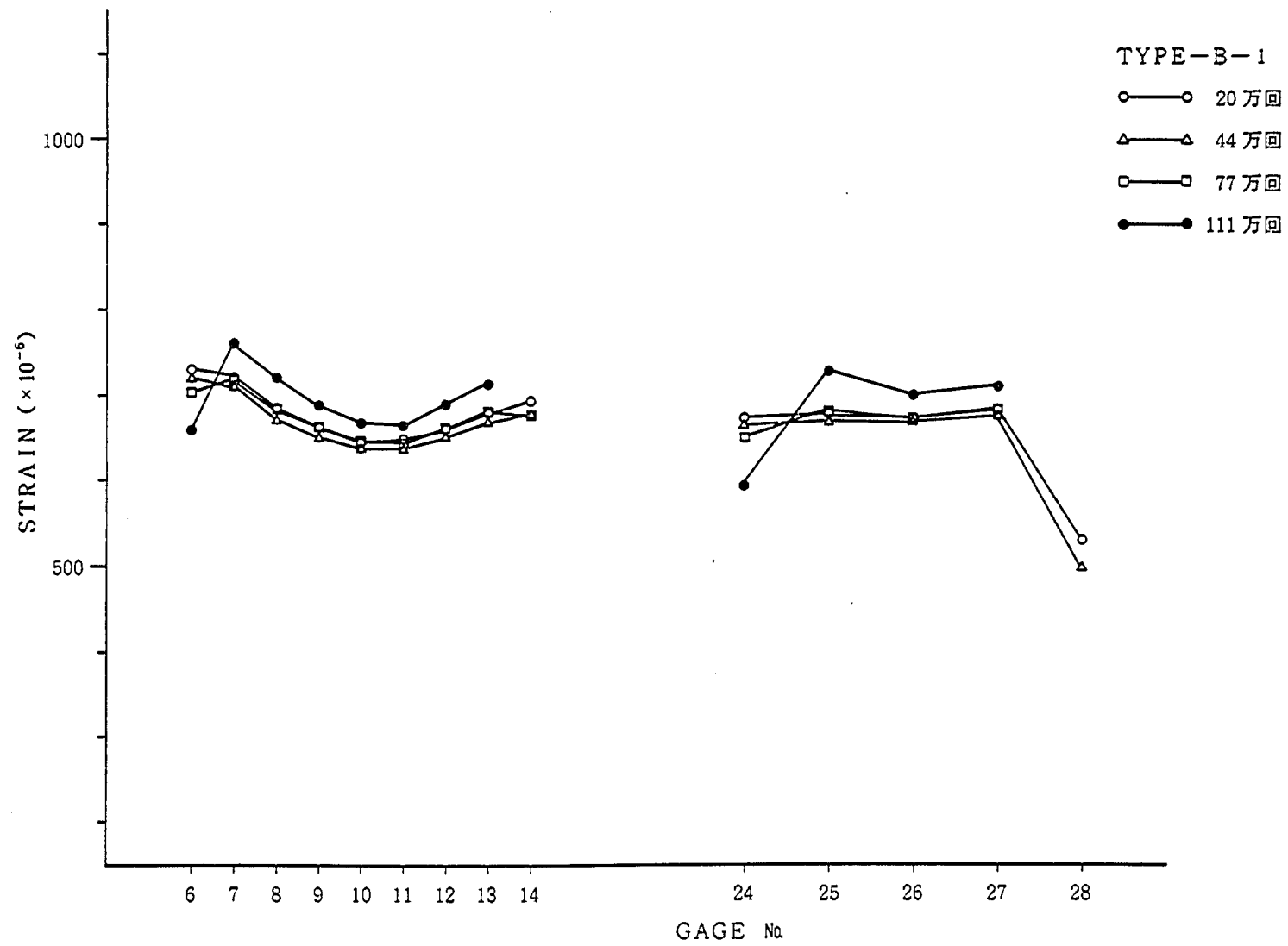


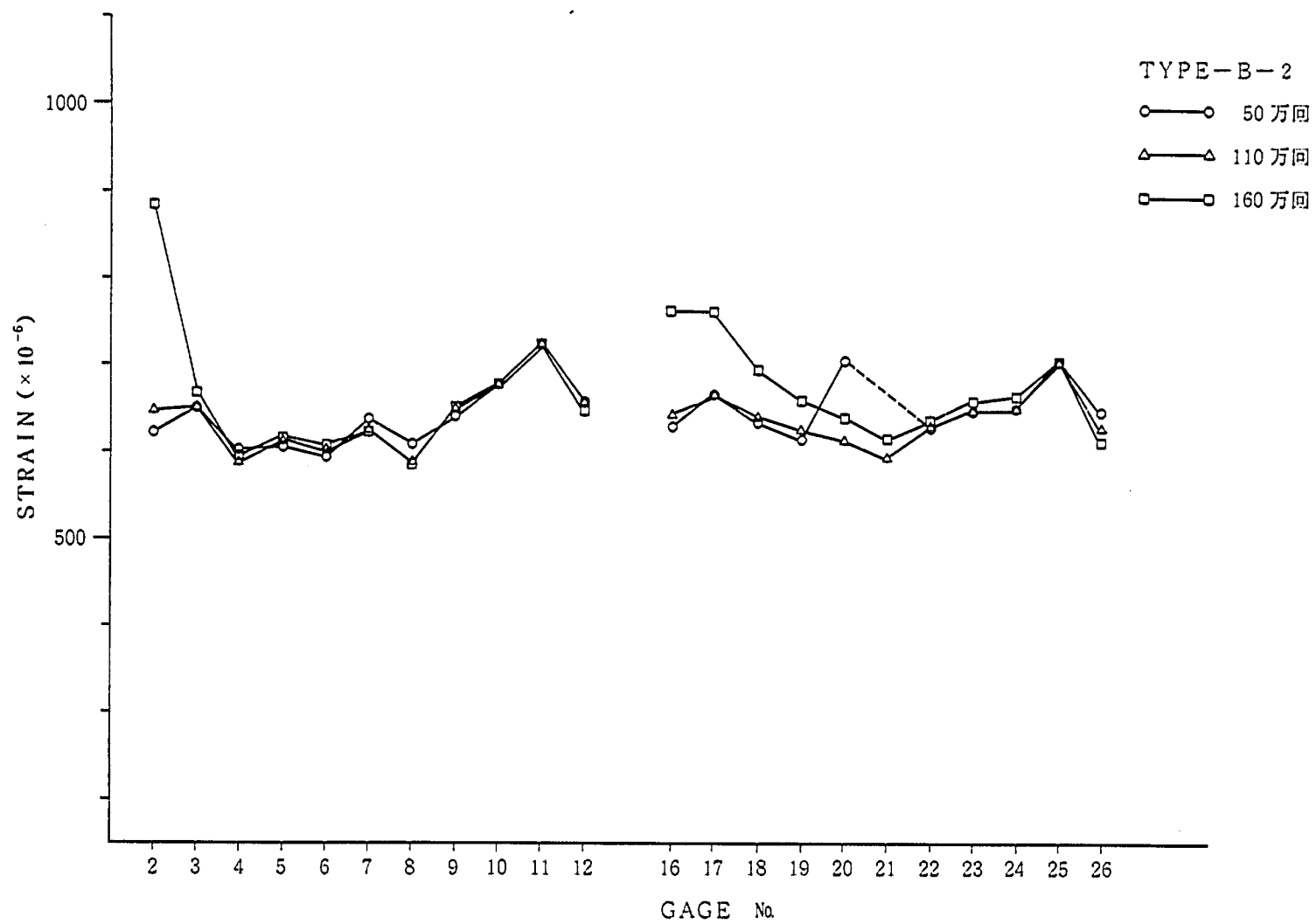
图-4.6 应力分布图



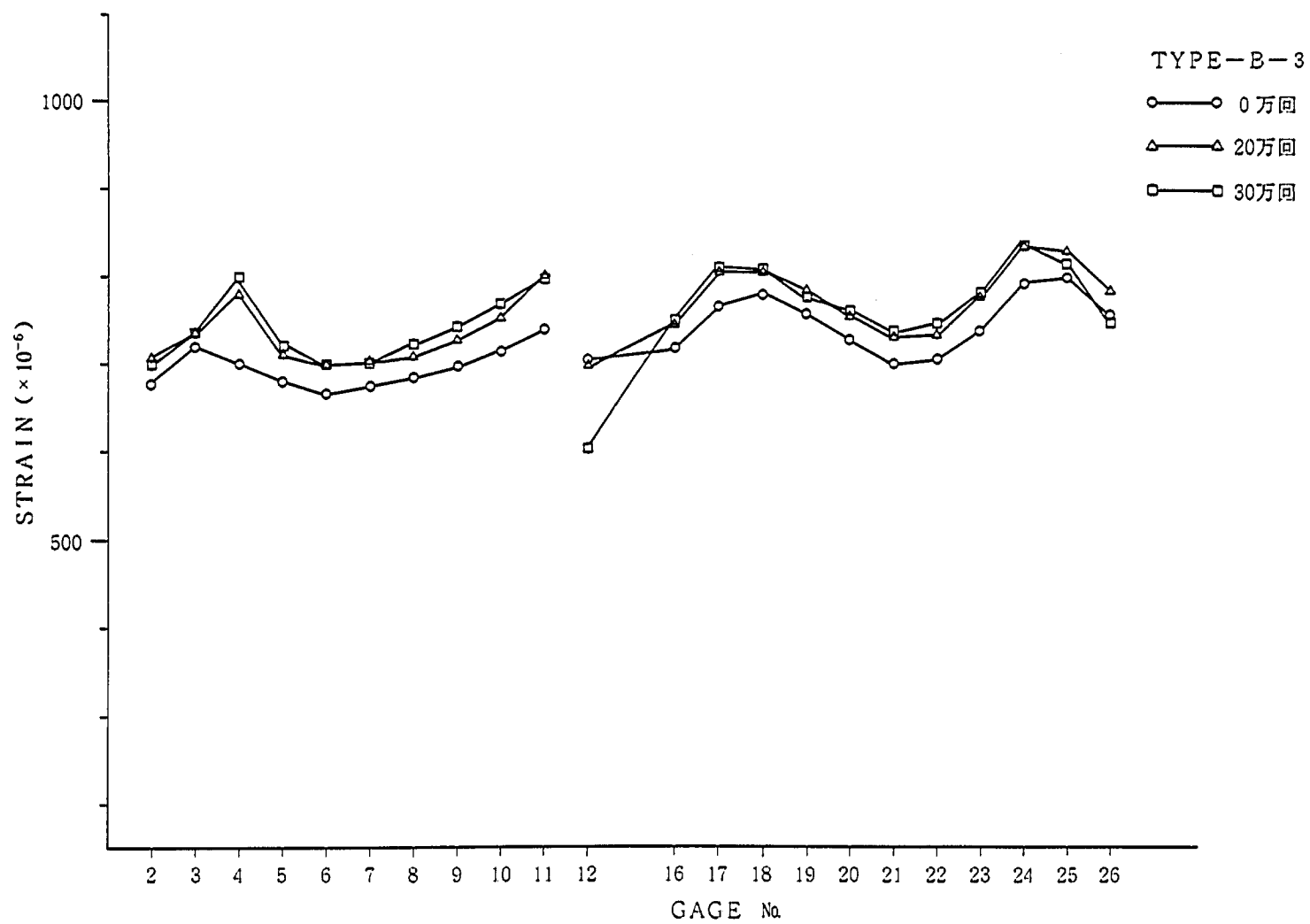
图一4.7 应力分布图



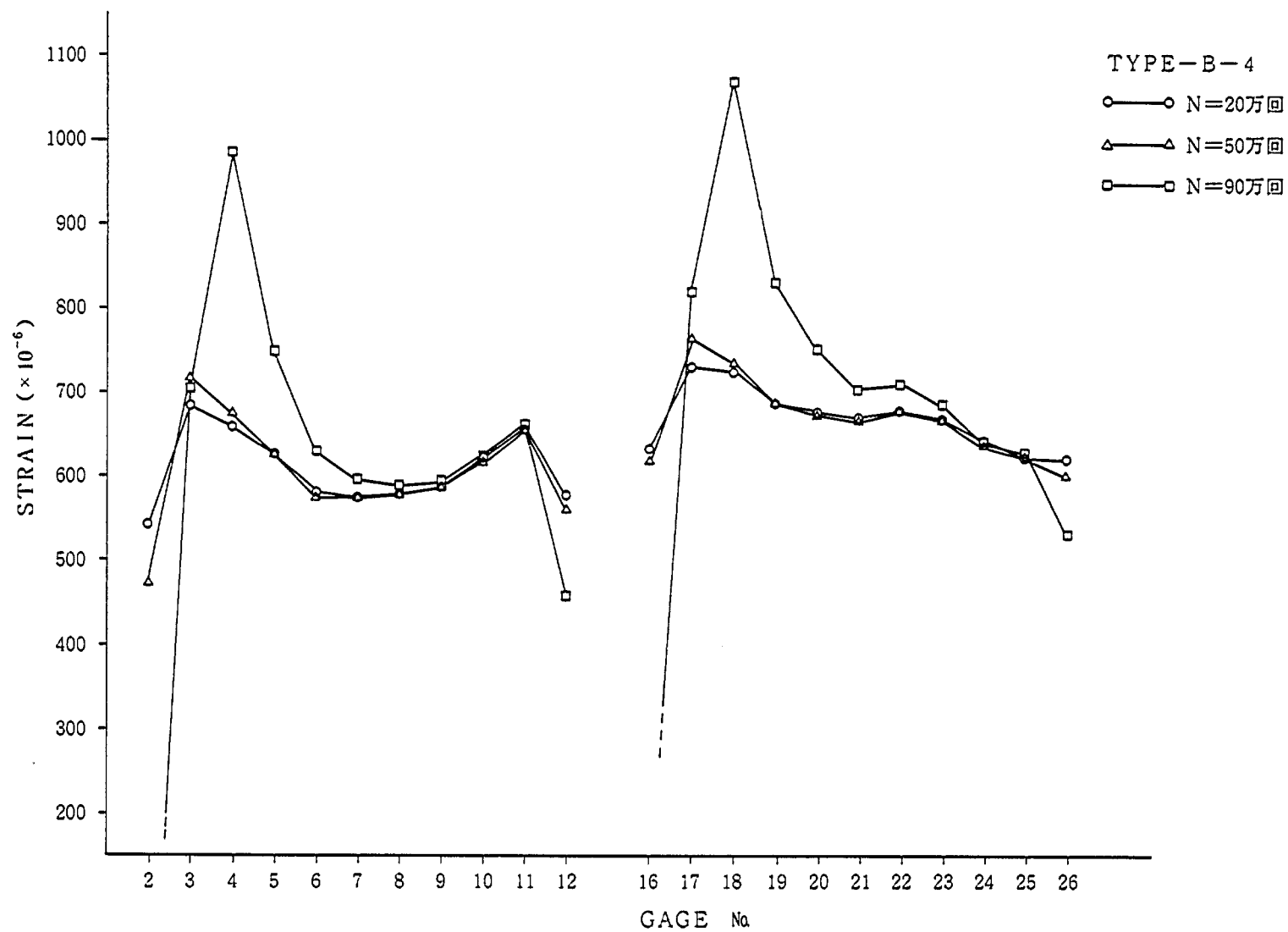
图—4.8 应力分布图



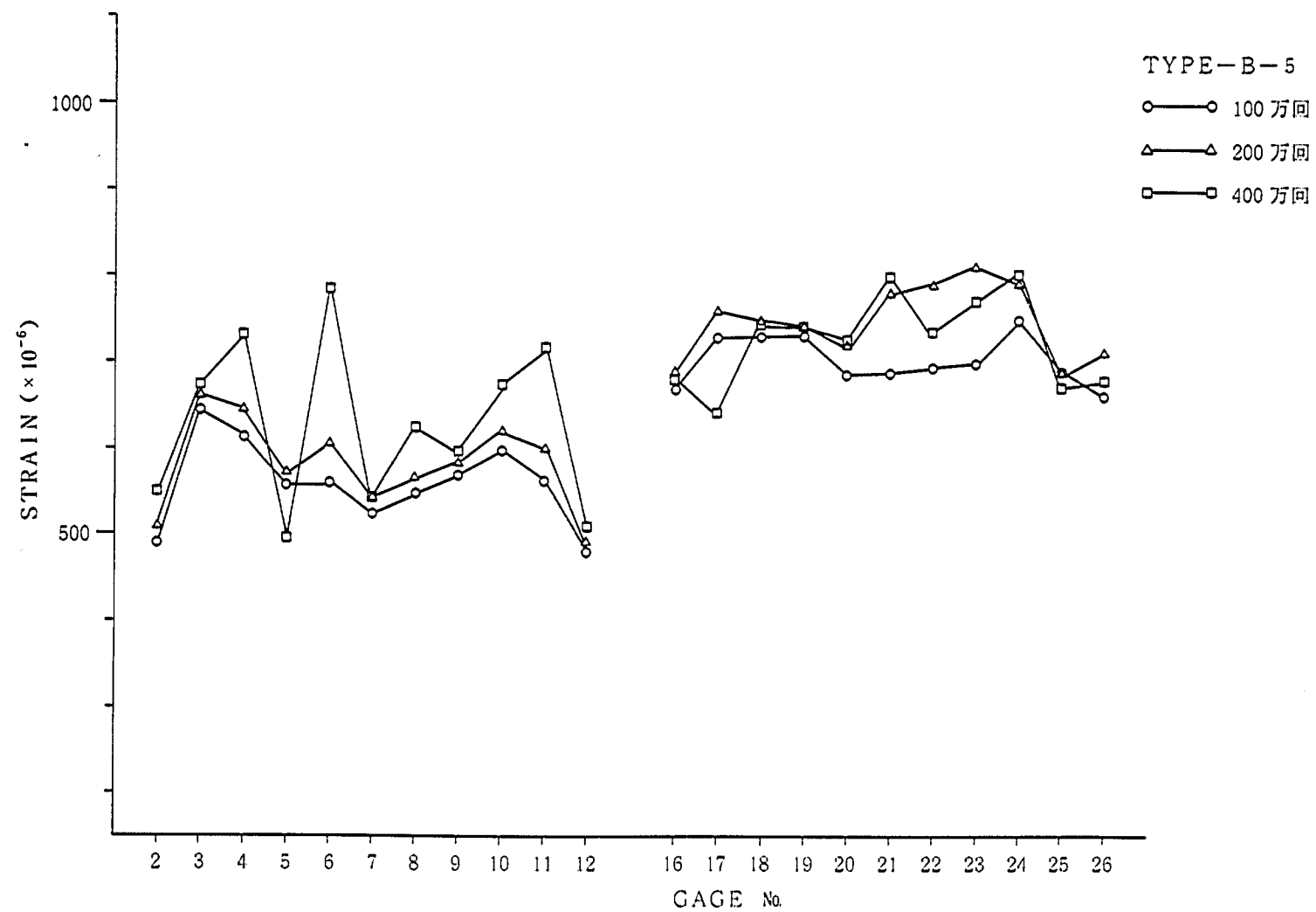
图一4.9 应力分布图



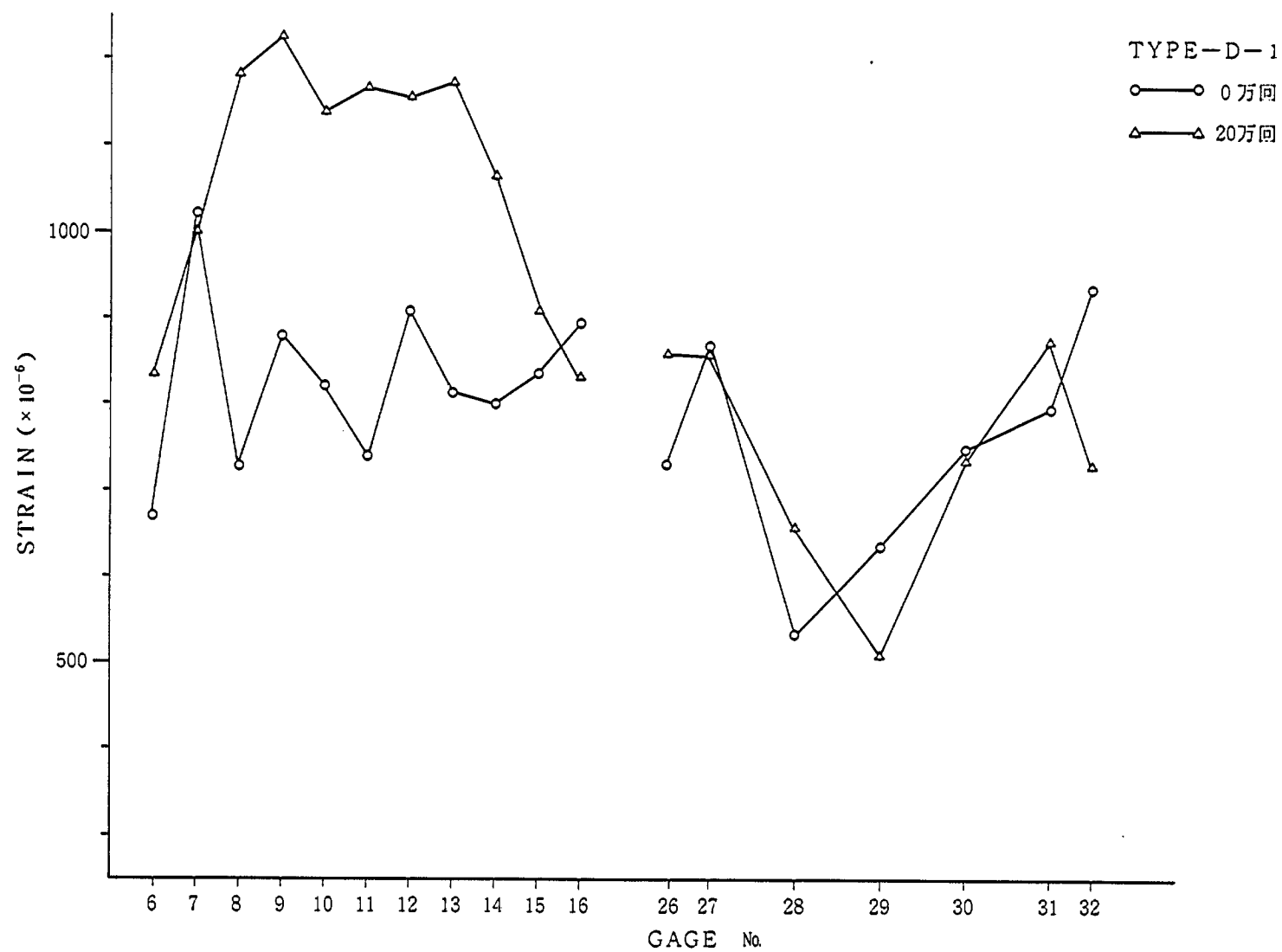
图一4.10 应力分布图



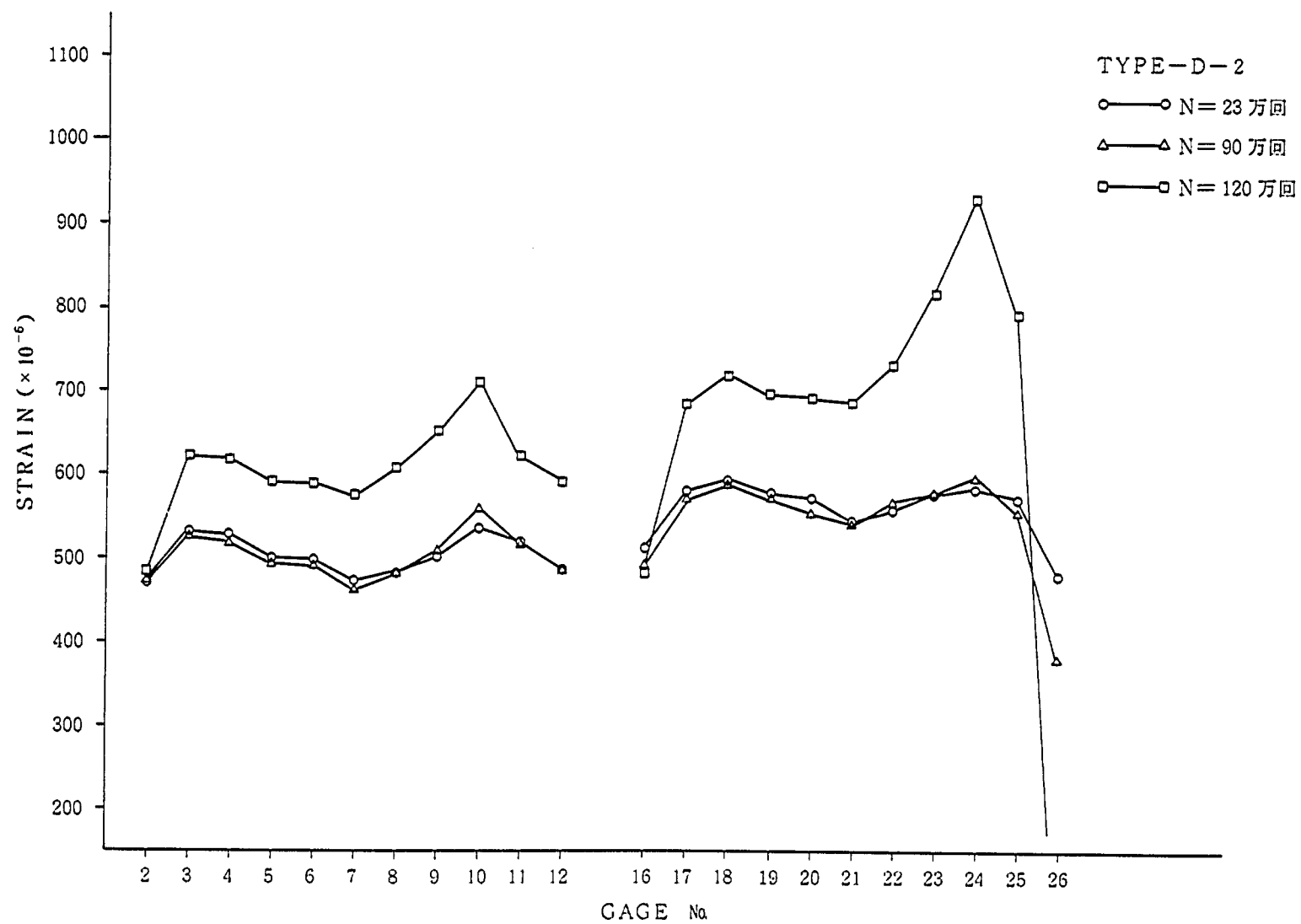
图一4.11 应力分布图



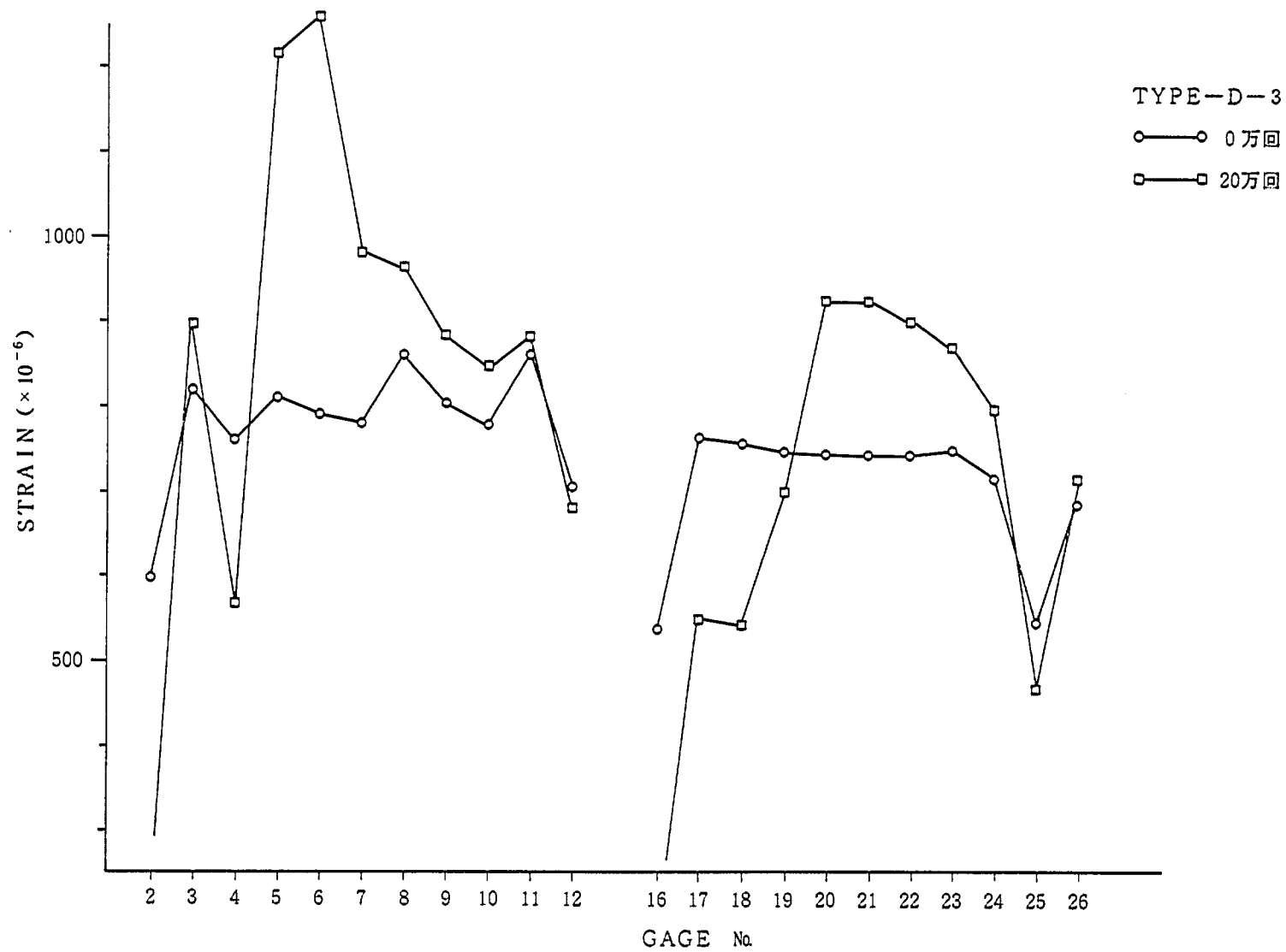
图—4.12 应力分布图



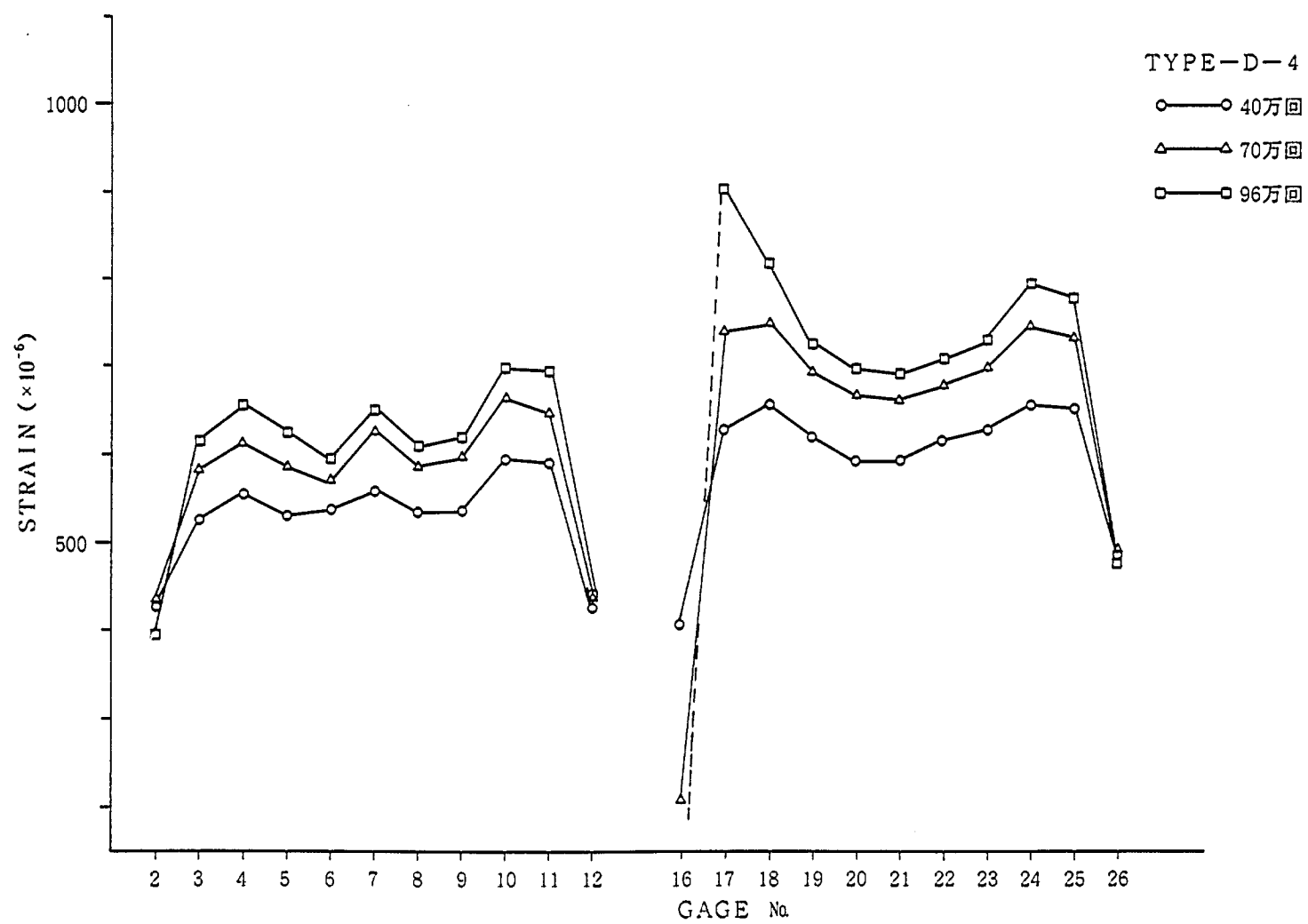
图—4.13 应力分布图



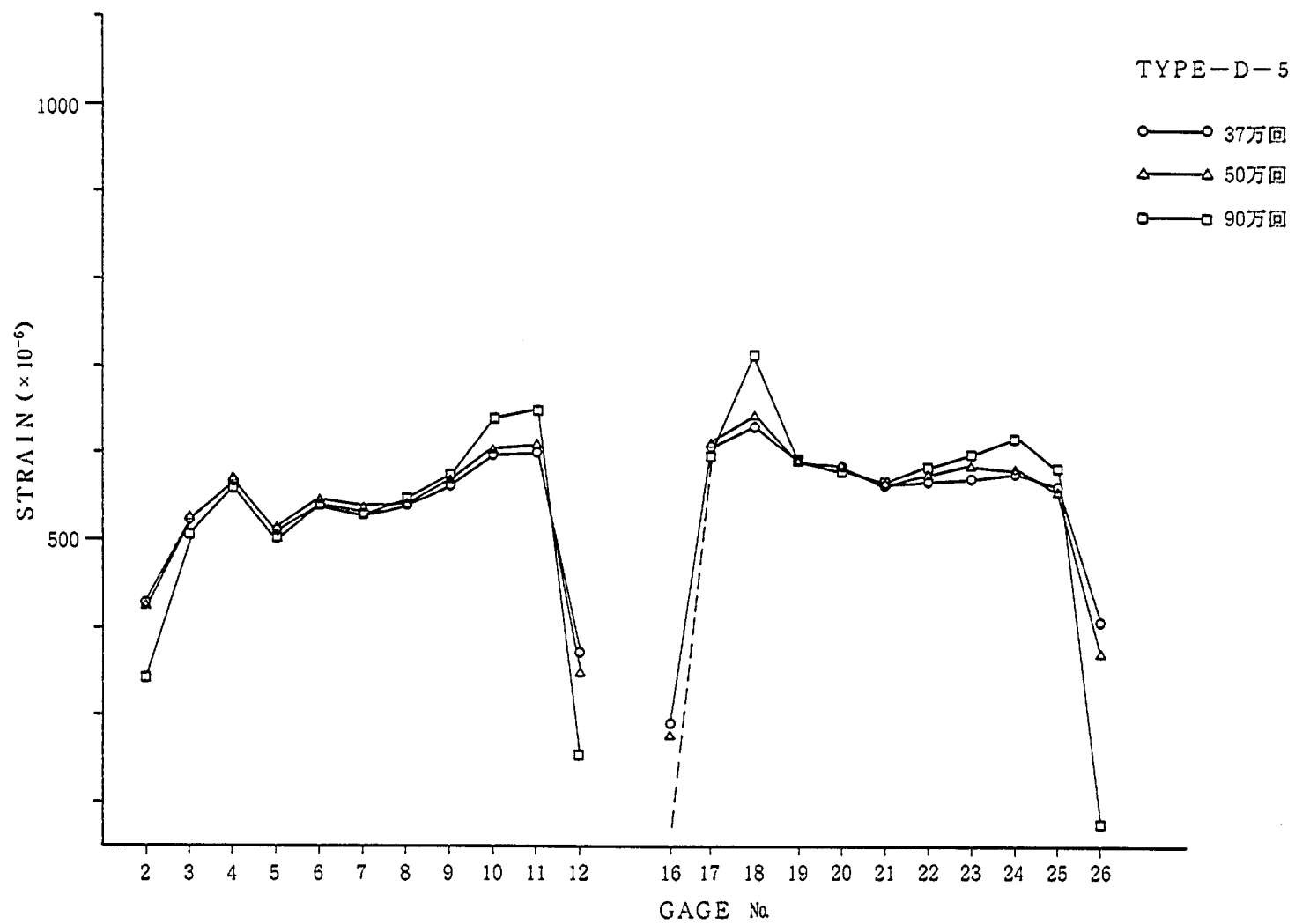
图一4.14 应力分布图



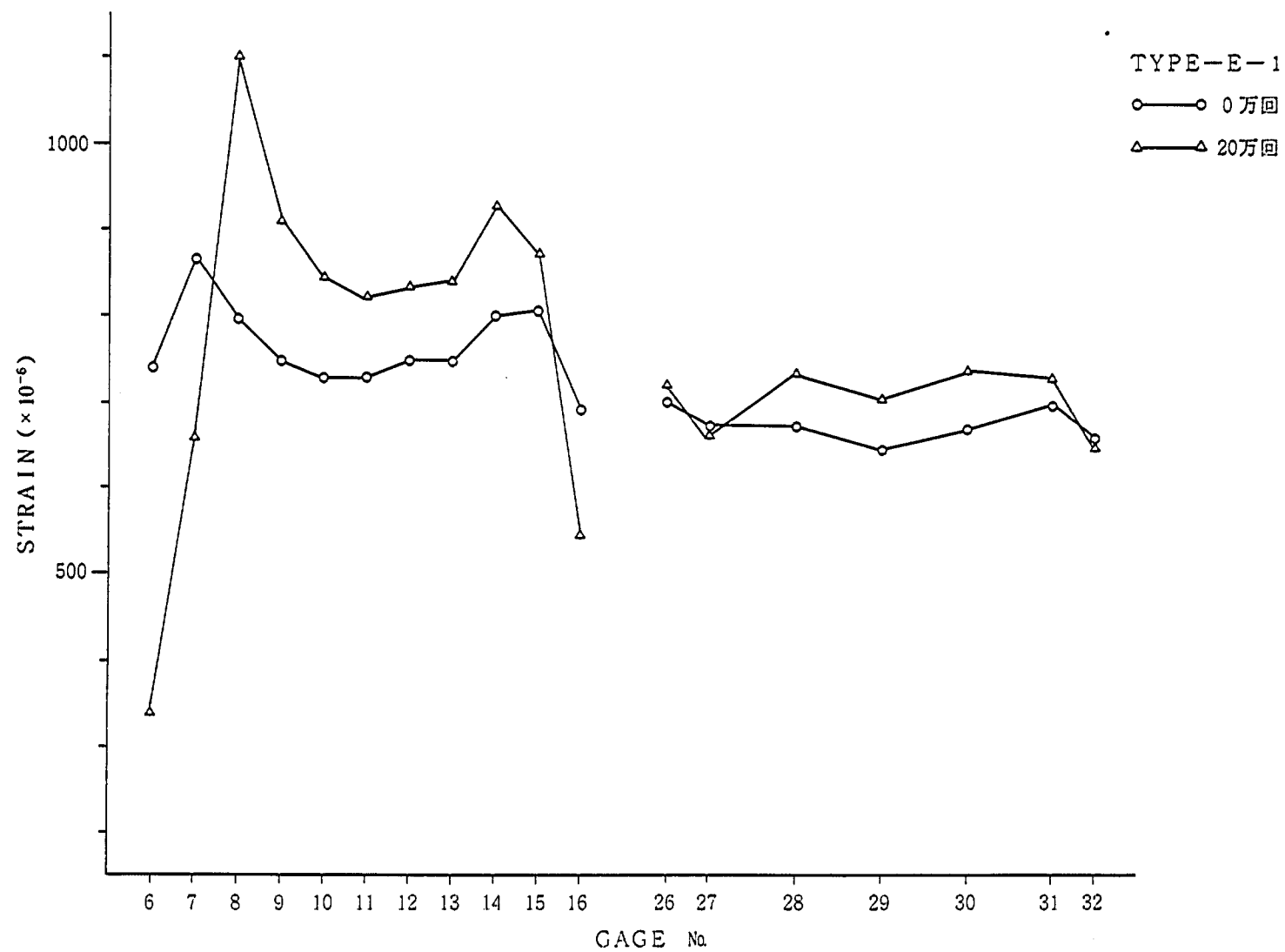
图一4.15 应力分布图



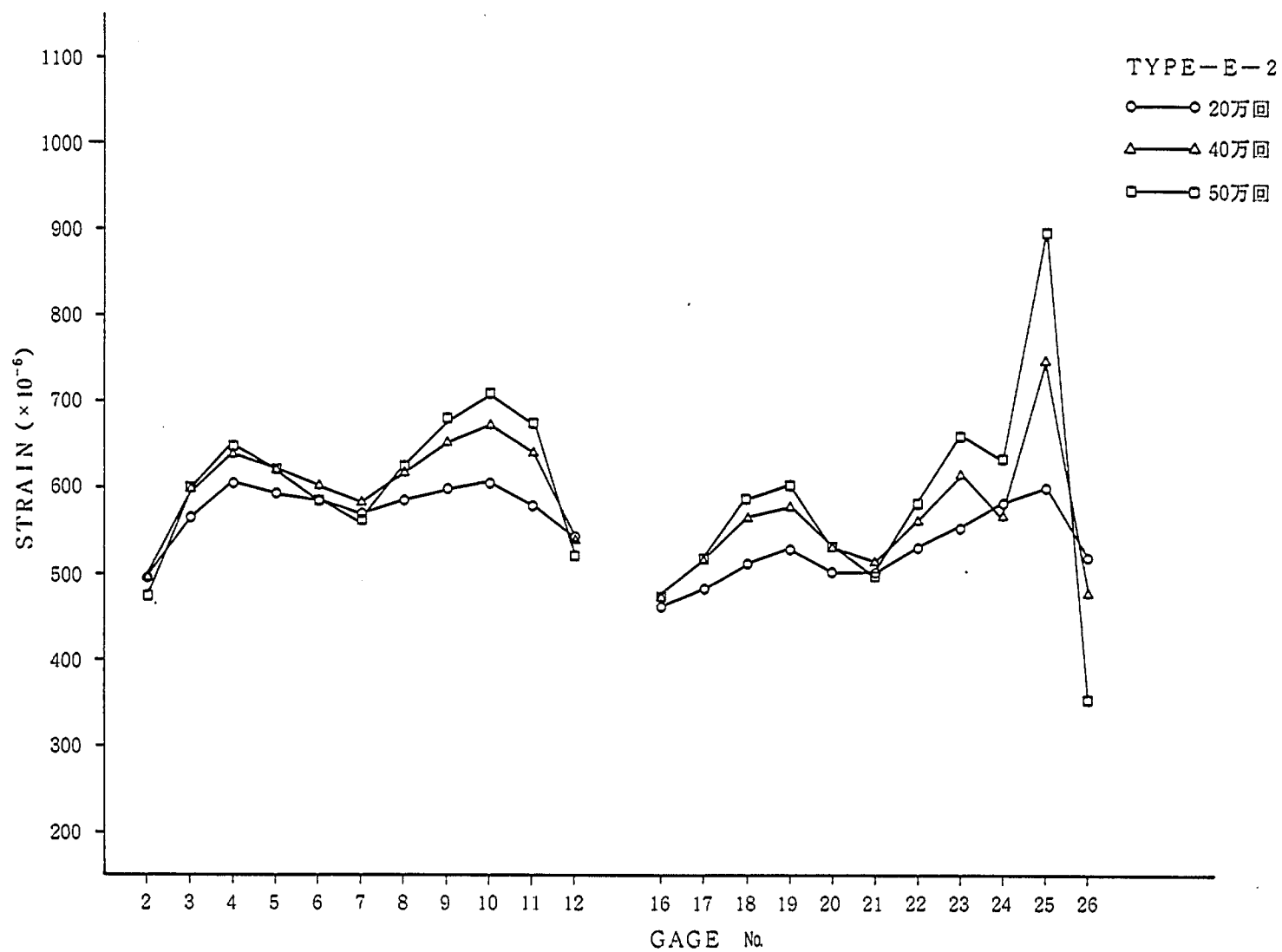
图一4.16 应力分布图



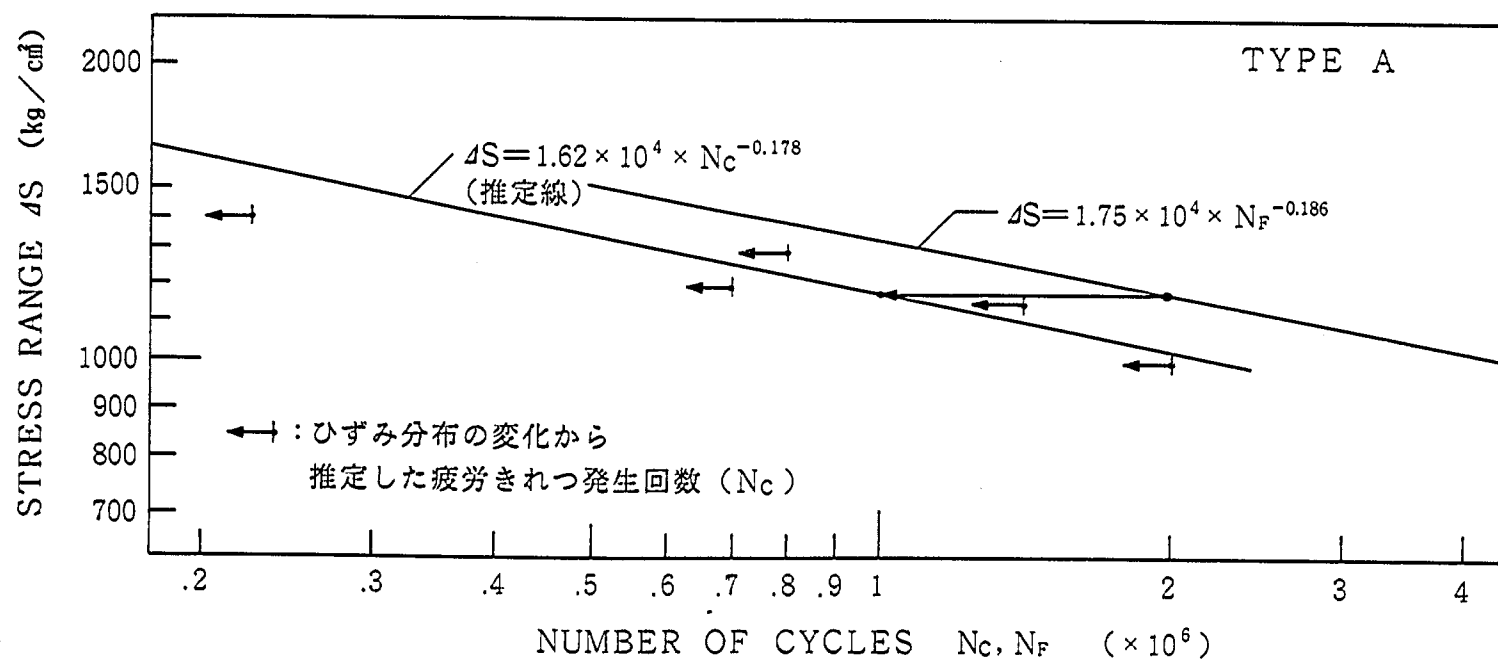
图—4.17 应力分布图



图一4.18 应力分布图



图一 4.19 应力分布图



図一 4.20 N_c 推定結果

5. 結 論

試験の結果、以下の点を明らかにすることができた。

- (1) 鋼床版トラフリブの現場溶接継手形式としては、疲労強度の面からTYPE-Aの裏当て金方式とTYPE-Bのダイヤフラムを裏当て金として使う方式が優れている。
- (2) TYPE-DおよびEは、疲労強度にばらつきが大きく、強度そのものもAやBに比べ劣っているので、トラフリブの継手形式としては不適當である。
- (3) 今回の試験結果から求めた基本疲労強度（応力範囲）は、TYPE-Aで1,108 kg/cm²、Bで1,177 kg/cm²となり、止端部の仕上げをしないリブ十字すみ肉溶接と同程度である。
- (4) (1)~(3)により、トラフリブの溶接継手形式としては、TYPE-AおよびBのいずれかをを用いるものとし、施工性等を考慮して決定するのがよいと考えられる。
- (5) TYPE-AおよびBでは、疲労クラックはすべて溶接ルート部から発生しており、とくにリブの曲げ加工部が発生点となっている例が多い。したがって、施工上ルート部の溶け込みに注意して施工することが重要であり、リブの曲げ加工部におけるリブと裏当て金とのすき間等の加工精度にも注意する必要がある。
- (6) 日本鋼構造協会疲労設計指針（案）による、 $\sigma_R - N_c$ 線の推定法は、溶接継手に対しては危険側となる可能性がある。

あ　と　が　き

今回の疲労試験により、鋼床版トラフ形縦リブの溶接継手として2種の望ましい継手構造を示すとともに、疲労による継手の破断性状を明らかにすることができた。しかし、同継手は現場溶接による施工となるため、溶接姿勢、継手精度等現場溶接特有の因子が継手品質に大きく影響するものと考えられる。今後は、現場での施工条件を考慮した疲労試験を行い、各種要因の影響度を明らかにしていく必要がある。

鋼床版トラフ形縦リブ溶接継手の疲労試験(Ⅰ)継手形式の選定

土木研究所資料 第2149号
昭和59年11月 (1984)
建設省土木研究所橋梁研究室
佐伯彰一, 西川和廣
滝沢 晃

キーワード: 現場溶接継手, 疲労試験, 継手形式(構造), 鋼床版, トラフ(U)リブ

要 旨

鋼床版トラフリブの溶接継手部の疲労試験を行い, 溶接継手の形式およびその疲労強度について検討したものである。



郵便はがき

40円切手
をはいて
下さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地
建設省土木研究所
橋梁研究室 御中

No. 17

No. 17

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第2149号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

