

© 1987 ISIJ

太径チェーンの応力分布におよぼす リンク形状の影響

技術報告

鈴木信一*・征矢勇夫*²・新田 宏*³・近藤正雄*³

Effect of the Link Shape of Large Chain on Stress Distribution

Nobukazu SUZUKI, Isao SOYA, Hiroshi NITTA and Masao KONDOU

Synopsis :

To improve the fatigue properties of a high strength chain, the relationship between the shape of link and the stress distribution in it has been investigated.

1) Stress in the chain link under load gives different distributions depending upon whether a stud exists or not.

2) Even though the chain link has a stud, the stud does not function under low load when a small gap exists between the link and the stud.

3) Dimple is generated on the inner surface of links owing to studding. When the stud does not function, the stress concentration occurs at the edge of dimple.

4) With increasing the contact area between links, the maximum stress under load decreases.

Key words : anchor chain ; stress analysis ; fatigue ; stress distribution ; shapes.

1. 緒 言

大型のハイテンチェーンは、船舶や石油掘削用リグの係留に多く使用されている。今後、海洋開発の進展にとともに、ハイテンチェーンの用途も多様化してくると考えられる。その場合、船舶のように一時的な係留ではなく、長期間の係留になると考えられる。そこで問題になるのが、チェーンの疲労破壊である。

ハイテンチェーンの疲労強度は、すでに多くのデータが報告されている^{1)~7)}。これらのデータの一部をまとめたのが Fig. 1 である⁸⁾。同図にみられるように、チェーンの疲労強度は、チェーンのグレードに関係なく、また、ばらつきが大きい。実際、チェーンの疲労破断位置は一定しておらず、破断位置が変わるとチェーンの疲労強度も変わることがわかっている⁵⁾⁸⁾。したがって、チェーンの疲労破断位置が一定していないことがハイテンチェーンの疲労強度のばらつきを大きくしている原因の一つである。この疲労破断位置が一定しない原因は引張荷重負荷時のチェーンリンク内の応力分布が各チェーンリンクごとに変化することにあると考えられる。したがっ

て、チェーンリンク内の応力分布におよぼす要因を明らかにすれば、チェーンの疲労強度のばらつきを小さくし、疲労強度を高める手段が生じる。従来、チェーンリンクの応力解析をした報告はある⁹⁾¹⁰⁾が、これらは、必ずしもチェーンの疲労強度を高めることを目的としたものではない。

本論文は、チェーンの疲労強度を安定させ、向上させる方策を見出すことを目的に、リンク形状およびスタッ

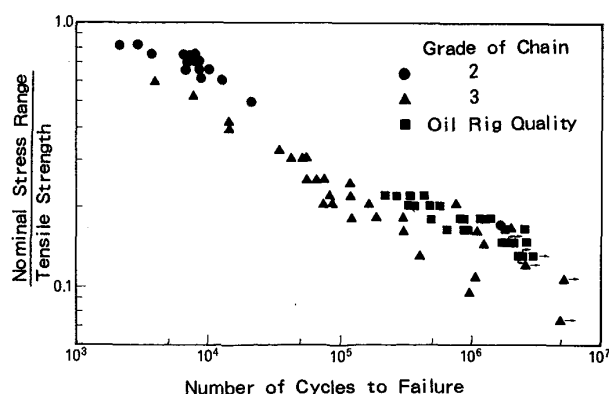


Fig. 1. Summary of fatigue strength of chains⁸⁾.

昭和 61 年 3 月 26 日受付 (Received Mar. 26, 1986)

* 新日本製鉄(株)厚板・条鋼研究センター (Plate, Bar, Shape & Wire Rod Research Lab., Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagami-hara 229)

*² 新日本製鉄(株)厚板・条鋼研究センター 工博 (Plate, Bar, Shape & Wire Rod Research Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 濱中製鎖工業(株)製造部 (Production Department, Hamanaka Chain Mfg.)

ドの有無がチェーンリンクの応力分布におよぼす影響を検討したものである。

2. 曲ばり理論によるチェーンリンクの応力解析

チェーンリンクの形状はリンクの中心軸線が半径 R_1 と R_2 の円弧からなるものと仮定する。そのリンクの四半分の形状および計算のための座標を Fig. 2 に示す。同図において、 Q_0 点に外力 P が作用すると、曲げモーメント M_0 とスタッドによる反力 S_0 が生じる。 P が増加すると、隣のリンクとの接触部が拡がり、Fig. 2 に示したリンクの斜線部分の変形が拘束されるようになる。この場合の接触角を α とし、 $0 \sim \alpha$ 間の変形は無視して、以下の計算をした。

Q_0 点の座標 (A, B) は、リンクの形状によつて決まる値で、ここでは JIS F 3303 に規定された普通リンクを対象にした。これによると、リンクの外長 L および外幅 W は、リンク断面の半径を D とすると、それぞれ $L=6D$, $W=3.6D$ である。したがって、 $A=2.5D$, $B=1.3D$ となる。これらの条件のもとにリンクの引張応力分布におよぼす α 、スタッドの有無およびリンク断面をだ円にすることの影響を調べた。ただし、リンクの変形におよぼすせん断力の影響は無視した。 Q_1 および Q_2 における軸力 N 、曲げモーメント M は次のようになる。

$$\alpha \leq \theta \leq \beta$$

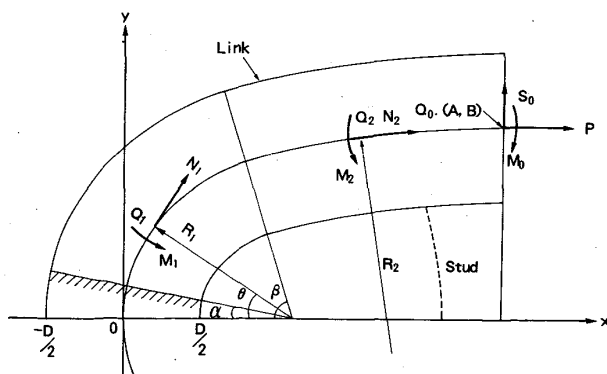
$$N_1 = P \sin \theta + S_0 \cos \theta$$

$$M_1 = M_0 + P(B - R_1 \sin \theta) - S_0(A - R_1 + R_1 \cos \theta)$$

$$\beta \leq \theta \leq \pi/2$$

$$N_2 = P \sin \theta + S_0 \cos \theta$$

$$M_2 = M_0 + PR_2(1 - \sin \theta) - S_0R_2 \cos \theta$$



Definition of angle α : Material confined between 0 and α is assumed to be rigid body in stress analysis

Fig. 2. Coordinate system used for stress analysis of chain link.

一方、曲ばり理論¹¹⁾によれば、リンク各部の引張応力 δ_x は次のように表される。

$$\delta_x = \frac{N}{F} + \frac{M}{FR} \left(1 + \frac{1}{x} \cdot \frac{\eta}{R + \eta} \right)$$

ここで、 F : リンクの断面積、 x : 形状係数、 η : 中心軸線からの距離、 R : R_1 または R_2 。これらの式によりリンク各部の δ_x が求められるが、そのために、 S_0 , M_0 を求めなければならない。それらは材料力学の公式¹¹⁾により求められる。以下、計算結果について述べる。

Fig. 3 は、 $R_1/D=1.1$, $\alpha=0$ のとき、スタッドのある場合とない場合の引張応力度 $K(\delta_x$ を公称応力 P/F で割った値) の分布の相異を示す。同図からスタッドの有無によつて、最大応力の生じる位置の異なることがわかる。スタッドのある場合は $\theta=69^\circ$ で、無い場合は $\theta=90^\circ$ であり、 $K_{max}(K$ の最大値) はそれぞれ 3.9 と 4.1 である。Fig. 4 は、 $R_1/D=1.1$ における α の影響を示す。 α によつて、 K が最大になる位置はほとんど変わらないが、 α が 20° , 40° と大きくなると、 K_{max} は 2.4, 1.3

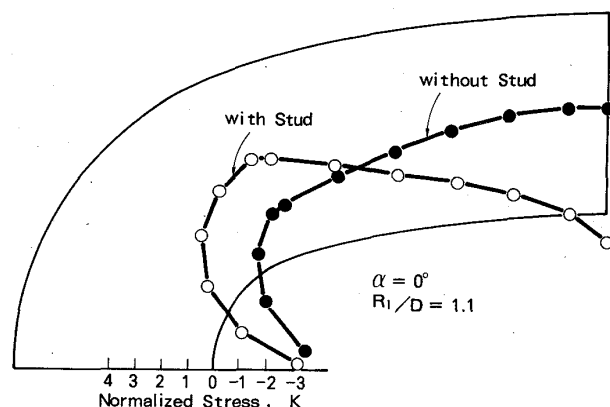


Fig. 3. Comparison of stress distributions in chain links between with and without stud.

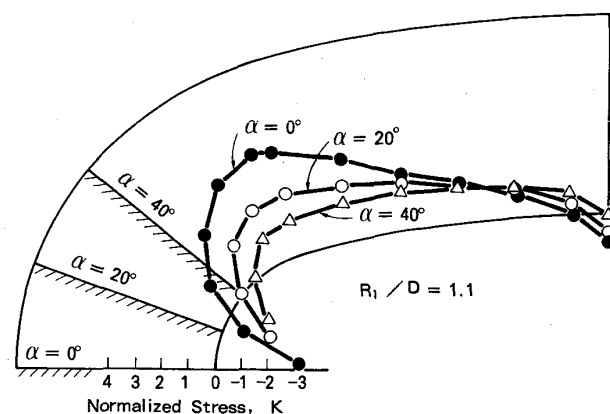


Fig. 4. Effect of α on stress distribution in chain link with stud.

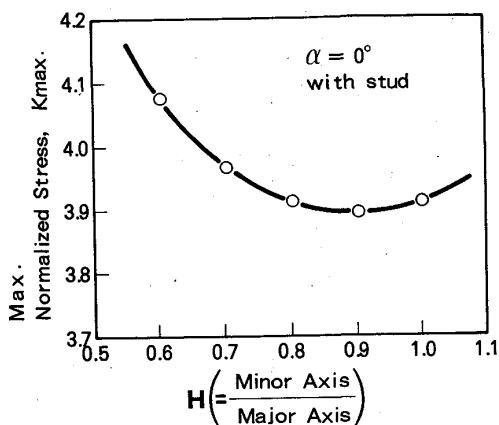
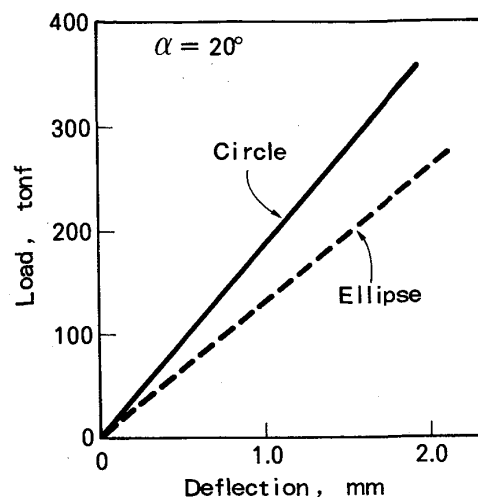


Fig. 5. Effect of axis ratio on maximum normalized stress.

と小さくなる。しかし、 α が大きくなると、リンクとリンクとの接触応力が変わるので、 $0 \sim \alpha$ 間の変形を無視することには問題があると考えられる。この点に関しては、後の示す FEM (有限要素法) によつて再検討する。

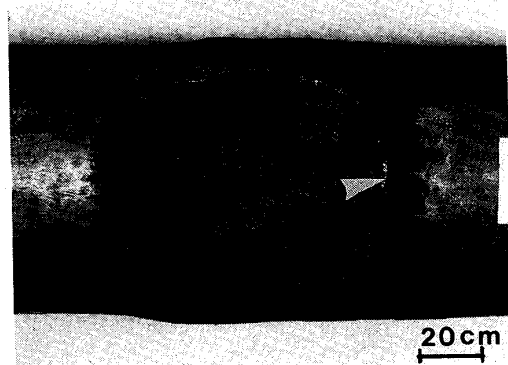
大型チェーンを製造するとき、太い棒鋼を熱間で曲げて成形するが、その際リンクの断面形状が多少偏平になる。その影響を調べるために、断面積一定で、だ円に変形したとして、 $R_1/D=1.1$, $\alpha=0$, スタッドありの条件で計算した。そして、短径と長径の比 H と K_{max} との関係を図 5 に示す。これからわかるように、円断面 ($H=1.0$) から $H=0.8$ 程度の偏平断面の範囲では、 K_{max} はほとんど変化しない。

スタッドの有無によつて、リンクの応力分布が非常に変わることを示したが、チェーン製造工程において、スタッドはリンクをフラッシュ溶接した後、まだリンクの温度の高いうちに、リンク中央にかん入される。このリンクが連結され、チェーンになつてから熱処理が行われる。この熱処理のとき、スタッドがゆるむ。そして、リンクとスタッドとの間にすきまができると、低荷重でリンクの変形が小さいとき、スタッドがあつても、それが十分に機能しないことが考えられる。そこで、 $R_1/D=1.1$, $\alpha=20^\circ$, 断面形状が円と $H=0.8$ のだ円の場合につき、リンク中央のたわみと引張荷重 P との関係を $D=76\text{ mm}\phi$ を例として、Fig. 6 に示す。例えば、リンクの断面が円の場合、リンクとスタッドとの間に 1 mm のすきまがあれば、約 200 tf の以下の荷重ではスタッドが機能しないことになる。リンクの断面形状がだ円の場合は、円の場合より低い荷重でスタッドが機能するようになる。



Cross section of link is circle with 76 mm dia. or ellipse with the same sectional area

Fig. 6. Relationship between tensile load and maximum deflection of chain links without stud.



An arrow shows the initiation site of fatigue crack

Photo. 1. Dimple pattern of chain link due to strong studding.

3. FEM (有限要素法) によるチェーンリンクの応力解析

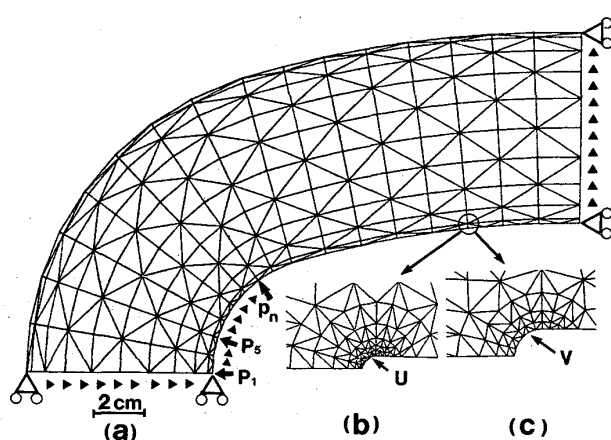
先の解析で、スタッドの影響の大きいことを述べた。実際の製造工程では、スタッドがゆるまないように、リンクにスタッド端部を押し込む。そのために Photo. 1 に示すように、リンクの内側にスタッドの押し込み跡が生じる。そのへこみ端部に応力集中が起こる。その応力集中の程度および接触角 α の影響を、FEM により平面応力条件で解析した。

チェーンリンクは、 $76\text{ mm}\phi$ の普通リンクで、 $R_1/D=1.1$ とし、用いた要素分割および境界条件を図 7 に示す。(a) はスタッドの押し込み跡のない場合で、(b), (c) はスタッドの押し込み深さが、それぞれ 2 mm , 4 mm の場合で、段差の近傍を拡大したものを示す。外力は、 $\alpha=$

Table 1. Loading conditions for stress analysis.

Loading point	Direction					
	X_{20}^* (kgf)	Y_{20} (kgf)	X_{40} (kgf)	Y_{40} (kgf)	X_{60} (kgf)	Y_{60} (kgf)
P_1	15 838	0	8 749	0	6 285	0
P_2	30 128	4 772	17 233	1 508	12 473	1 092
P_3	25 626	8 326	16 442	2 900	12 194	2 150
P_4	18 620	9 488	15 154	4 060	11 732	3 104
P_5	9 788	7 112	13 404	4 878	11 096	4 038
P_6	—	—	11 248	5 246	10 294	4 800
P_7	—	—	8 748	5 050	9 338	5 392
P_8	—	—	5 984	4 190	8 244	5 772
P_9	—	—	3 038	2 550	7 028	5 898
P_{10}	—	—	—	—	5 706	5 706
P_{11}	—	—	—	—	4 298	5 122
P_{12}	—	—	—	—	1 312	2 272

* Suffix shows the contact angle α between links



U & V correspond the end points where restriction of deformation is assumed to occur with the stud

Fig. 7. Finite element subdivision for chain link without dimple (a), with 2 mm deep dimple (b) and 4 mm deep dimple (c).

20° の場合, $0 \leq \theta \leq 20^\circ$ までの各接点に $P_1 \sim P_5$, $\alpha = 40^\circ$, 60° の場合はそれぞれ $P_1 \sim P_9$, $P_1 \sim P_{12}$ に分散させた. 各荷重の大きさは Table 1 に示す. また, 解析に用いた降伏点は 87 kgf/mm^2 とした.

Fig. 7 に示したチェーンリンクの四半分にかかる引張荷重を 100 tf (公称応力: 22 kgf/mm^2) とし, $\alpha = 20^\circ$ の場合のスタッドの有無によるリンクの主応力分布の比較を Fig. 8 に示す. これらの結果は曲がり理論で計算した結果と傾向がよく一致している. しかし, スタッドのある場合の両者の K_{max} を比較してみると, $\alpha = 20^\circ$ における曲がり理論の結果は 2.4 であるのに対し, FEM の結果は 3.4 である. そこで, FEM により $\alpha = 40^\circ, 60^\circ$ で, スタッドのある場合についても主応力分布を計算した. これらの結果を Fig. 9 に示す. それぞれの K_{max} は 3.3 と 3.0 で, α が大きくなると, K_{max} が低下する. しかし, 曲がり理論の計算結果ほど K_{max} の低下は大きくない. これらの値の妥当性については, チェーンリンク

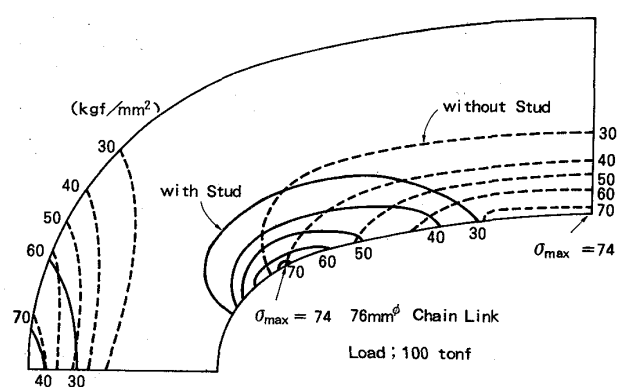


Fig. 8. Comparison of principal stress distributions in chain links between with and without stud.

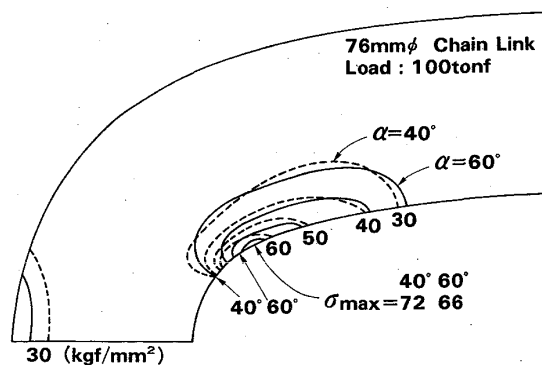


Fig. 9. Comparison of principal stress distribution in chain link between 40° and 60° of contact angle.

クの歪み分布を実測し, 比較検討したので後に述べる.

引張荷重 100 tf, $\alpha = 20^\circ$, スタッドの押込み深さが 2 mm, 4 mm で, それぞれスタッドのある場合, ない場合の主応力分布を Fig. 10, 11 に示す. スタッドが機能しておれば, 押込み深さが 2 mm であつても, 4 mm であつても, 押込みの影響はほとんどない. しかし, スタッドがない場合は, 押込みによる段差のところに, 大きな

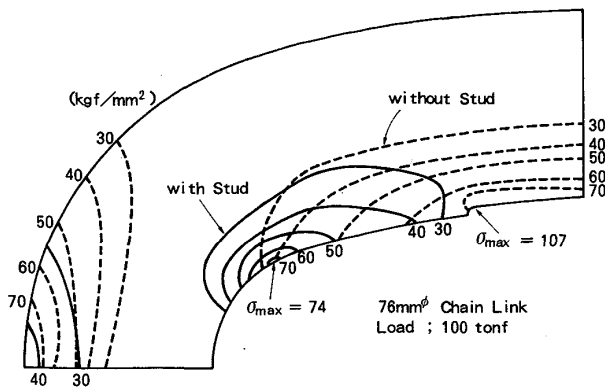


Fig. 10. Principal stress distributions in chain link with 2 mm deep dimple.

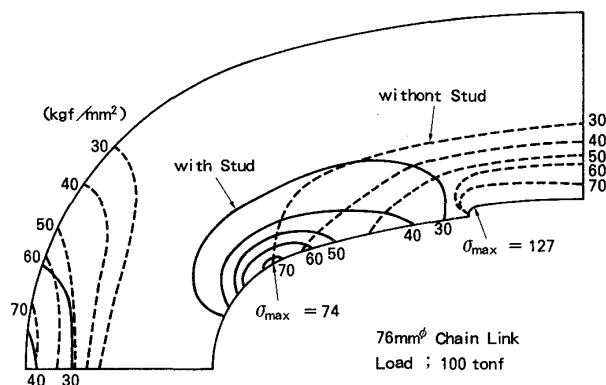


Fig. 11. Principal stress distributions in chain link with 4 mm deep dimple.

応力が生じる。そして押込みの深さが大きいほど、その応力は大きく、応力集中係数は、2 mm のとき、4.9, 4 mm のとき、5.8 となる。リンクにスタッドの押込み跡のある場合、スタッドの機能がいつそう重要なことがわかる。

一方、スタッドが十分に機能している場合であつても、スタッドの端部形状およびかん入の状態によつては、必ずしもスタッドの端部周辺が、リンクと一体化していない場合が予想される。そこで、2 mm と 4 mm の場合につき、スタッドによる拘束点を、Fig. 7(b), (c) に示した歪み低部の u, v 点までとして解析し、応力分布を調べた。その結果、u 点の場合も v 点の場合も、これらの点に近い 2 要素にのみ、それぞれ 3.7, 3.9 の大きな応力集中係数を示すが、いずれの場合もリンク全体の応力分布は Fig. 10, 11 に示したスタッドのある場合はほとんど変わらなかった。

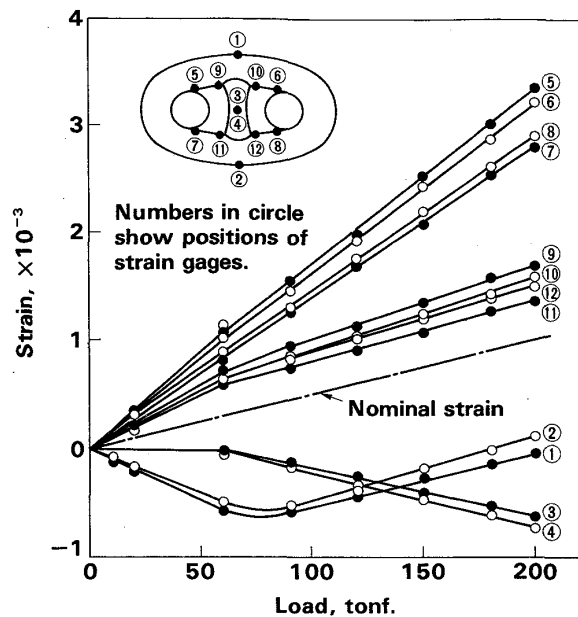


Fig. 12. Static load vs. local strain curves in 76 mmφ chain link.

4. 実測したチェーンリンクの歪み分布

482 tf の耐力試験荷重を負荷した 76 mmφ の 3 リンクから成るチェーンを用い、中央のリンクに歪みゲージを貼り、600 t 引張試験機で引張荷重を負荷して歪み分布を測定した。その結果を Fig. 12 に示す。なお、このリンク材の引張強さおよび耐力はそれぞれ 98 と 87 kgf/mm² である。

引張歪みの大きい位置は、図に示した⑤、⑥、⑧、⑦で、バンド部に近い所である。200 tf におけるこれらの位置の歪みの平均値から K を求めると、3.0 となる。この試験後、リンクとリンクとの接触角 α を測定すると、20°~25° であつた。前述の $\alpha=20^\circ$ の場合の計算による K の値は、曲がり理論では 2.4, FEM では 3.4 であるから、歪み測定から求めた K の値はこれらの間にある。しかし、実測した⑤~⑧のゲージがリンク内の最大歪みを測定したとはいえない。実際はもつと隣のリンクに近い所（現実にはゲージを貼ることができない。）に最大歪みが生じると考えられる。したがつて、曲がり理論による K の値より、FEM による K の値の方が実際に近いと思われる。

また、スタッドに貼つた③、④のゲージによる歪みは約 60 tf まで 0 である。これは、この荷重までスタッドが機能していないことを示すものである。そのために、①、②のゲージには圧縮歪みが生じており、これらゲージの反対側に位置するリンクとスタッドとの接合部中央

には曲げ変形による引張歪みが付加されることは明らかである。この傾向は、スタッドのない場合の計算結果と一致している。

5. 考 察

一般的に、鋼構造物あるいは機械部品の疲労破壊は、それらの使用時に、局部に発生する最大引張応力によって起こる。そのために、このような引張応力ができるだけ発生しないように、設計および製造に工夫がなされている。本論文は、チェーンの疲労強度を支配する力学的要因を明らかにするために、チェーンリンクの応力分布を調べた。そして、チェーンリンクに発生する最大引張応力およびその発生位置は、リンクにおけるスタッドのかん合状態がもつとも大きく影響することを明らかにした。

スタッドが十分に機能している場合、チェーンリンクに発生する最大引張応力は公称応力の 3.4 倍 ($K=3.4$) で、その発生位置はバンド部である。この 3.4 倍という値は、接触角を 20° とした FEM の計算結果であるが、従来のデータ ($K=3.5\sim 3.8$)²⁾¹⁰⁾ と比較すると低い。これは荷重条件およびメッシュの大きさ等、計算の条件の相違によるものと考えられる。

一方、スタッドがないか、あつても機能していない場合、最大引張応力は公称応力の 3.4 倍 (Fig. 8 参照) で、その発生位置はリンクの平行部の内側である。スタッドのある場合とない場合の最大応力度はほとんど差がないが、発生位置は全く異なる。後者の発生位置はチェーンリンクのフラッシュ溶接部に一致するので、もし溶接欠陥があれば、そこに大きな応力集中が起こり、チェーンの疲労強度は異常に低い値になると考えられる。さらに、チェーンリンクには、先に述べたスタッドの押込みによる段差がある。スタッドが機能しておれば、その段差は無視できるが、機能していなければ、その段差の所に大きな応力集中が起こる。76 mm ϕ チェーンリンクにおいて、段差およびコーナーの半径を 2 mm とすると、応力集中係数は 4.9 にもなる。実際、疲労試験したチェーンリンクの破断がこの段差のところで起こっているものがある⁶⁾。この事実は試験したチェーンリンクのスタッドが十分に機能していなかったことを示すものである。

スタッドを完全に機能させるためには、リンクとスタッドとを完全に溶接することが一つの手段である。今でもリンクとスタッドとを溶接しているチェーンもあるが、その溶接方法はスタッドの一端のみ、全周を溶接するかあるいはスタッドの両端 4 箇所を部分溶接したものが多い。このような溶接をしたチェーンの疲労破断位置

をみると、前者の場合はスタッドの押込みによる段差あるいは溶接トウが多く、後者の場合は溶接の始端あるいは終端が多い⁵⁾⁶⁾。これらのスタッドの溶接方法がいずれも不完全で、スタッドが十分に機能しないため、その溶接近傍で疲労破断したのものと考えられる。このように破断位置が変化すれば、そこに発生する引張応力の大きさが変化し、チェーンの疲労強度も変動する。したがって、スタッドを完全に溶接してリンクと一体化すれば、チェーンの疲労破断位置はバンド部に一定し、疲労強度の変動も小さくなると考えられる。

さらに、前述の計算結果からチェーンの疲労強度を積極的に向上させる一手段として、リンクとリンクとの接触角を大きくすることが考えられる。すなわち、接触角を大きくすると、バンド部の引張応力が低下するので、チェーンの疲労強度は高くなると考えられる。しかし、接触角を大きくすると、チェーンのねじれに対する自由度が小さくなり、ねじれによる新たな応力の発生およびチェーンのハンドリングが困難になることを考慮しなければならない。

6. 結 言

ハイテンチェーンの疲労破壊は破断位置が一定していないために疲労強度のばらつきが大きい。これらの原因がチェーンリンクの応力分布の変動にあると考え、この応力分布におよぼすリンク形状の影響を明らかにした。その結果を以下に要約する。

- 1) チェーンリンクは単なるスタッドの有無によつてリンクの応力分布が異なり、最大引張応力の発生位置が異なる。しかし、その大きさはほとんど変わらない。
- 2) スタッドがあつても、リンクとスタッドとの間にわずかなすきまがあれば、低荷重下では、スタッドは機能しない。
- 3) リンクとリンクとの接触角が大きいほど、バンド部に発生する最大引張応力は小さくなる。
- 4) スタッドの押込みによつてできるリンクの内側の段差は、スタッドが機能しておれば、その影響は全くないが、スタッドが機能していなければ、そこに大きな応力集中が生じる。
- 5) この場合スタッドのゆるみがなくても、スタッド端部周辺とリンクとの間にすきまがあれば、段差部に応力集中が生じる。

終わりに、本研究を進めるにあたつて、多大の制援助をいただいた濱中製鎖工業(株)浜中社長、福島課長に感謝致します。

文 献

- 1) G. de LAVAL: OTC paper No. 1503 (1971)
- 2) I. CELANDER: OTC paper No. 1578 (1972)
- 3) 日本鋼管(株)津研究所, 日本海事協会係留研究委員会資料 MA-5-1 (1981)
- 4) 川面武雄, 岡田昭寿, 林 久男, 田中義久: 船舶技術研究所発表会講演集 (1975)
- 5) 関口 進, 石井伸幸, 高島弘教, 鈴木信一, 横川孝男: 鉄と鋼, **63** (1977), S307
- 6) 日本造船研究協会, 第 187 研究部会報告書 (1983), p. 182
- 7) L. C. van HELVOIRT: OTC paper No. 4179 (1982)
- 8) 日本造船研究協会, 第 179 研究部会報告書 (1982), p. 254
- 9) 浜野和夫: 日本造船協会会報 (1948) 83, p. 143
- 10) 神戸製鋼所(株)構造研究所, 日本海事協会係留研究委員会資料 MA-2-3 (1980)
- 11) 奥村敦史: 材料力学 (1976), p. 306 [コロナ社]