

内海 秀幸¹・関田 欣治²・新田 宏³
Hideyuki USTUMI, Kinji SEKITA, Hiroshi NITTA

¹正会員 工博 千葉工業大学 土木工学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

²正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

³濱中製鎖工業株式会社 網干工場 (〒671-1231 兵庫県姫路市網干区大江島810-1)

Recently a floating structure tends to be in-placed offshore as long as twenty years. As anchor chains for mooring system, not only conventional ones having a stud but also new type ones without a stud are used. In such a case, durability of chains, especially fatigue strength is required. Fatigue strength depends on stress concentration factor (Kt). Besides this, erosion or abrasion concentrated in a contact area of chain links is taken into considerations for the evaluation of fatigue strength. Therefore, we conducted two dimensional stress analyses for the intact chain and the chains subjected to erosion or abrasion by linear Boundary Element Method (BEM). As a result, the following conclusions are obtained: Firstly the Kt of new type chains is greater than that of the conventional ones but the Kt induced in outer edge of link is almost equal to that in inner edge. Meanwhile the Kt induced in outer edge of conventional chains is larger than that in inner edge. The Kt of both new type chains and conventional ones having erosion or abrasion are greater than the ones of the undamaged chain by 14%.

Key Words : Stress concentrated factor, fatigue strength, BEM stress analysis, offshore chains

1. はじめに

アンカーチェーンは使用状態でお互いのリンク同士がぶつかり合い接触部が集中的に摩耗や腐食により衰耗する欠点がある。現在、大規模浮体の建設にともない長期間係留に対するチェーンリンクの疲労耐久性性を評価することが求められており、衰耗(摩耗や腐食)によるリンクの形状変化がその疲労耐久性にどのような影響を与えるかを検討することが重要な課題となっている。一般に対象とする部材の疲労耐久性性を評価するには、長期間にわたる海水中での低サイクル疲労実験が必要となる。一方、弾性理論に基づいた研究より疲労強度は部材に発生する応力集中の大きさに依存することが報告されており¹⁾、解析的なアプローチを用いて応力分布を明らかにすることで疲労強度を評価することが出来る。そこで、本研究では疲労強度を支配する力学的要因(応力集中)に着目し、衰耗による形状変化がチェーンリンク応力集中の発生特性に与える影響を明らかにすることを目的とする。対象とするチェーンリンク形状は楕円形状のリンクにスタッドを有するもの、ならびに直線部と曲がり部からなる新

型のチェーンリンクである。本報告では上記二種類のチェーンリンクを均質・等方・線形な弾性体と仮定し、引張り荷重載荷時における二次元静弾性解析を境界要素法²⁾(BEM: Boundary Element Method)による数値計算法により行った。本検討ではリンク境界上の接線方向応力比 $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$ (σ_0 : 載荷荷重をリンク断面積で除したに応力)ならびにその応力比の最大値を応力集中係数として、リンクの衰耗による形状変化とそれらの関係を明らかにした。

2. チェーンリンクの力学特性

従来型のリンク形状は図-1に示すように楕円状のリンク中央に支持棒であるスタッドが取り付けられている。この種のチェーンリンクは船舶や移動可能なリグ等の海洋構造物係留用のアンカーチェーンとして幅広く使用されている。一般に引張り荷重がリンク両端部に作用することにより、リンクには曲げモーメントが発生しリンク両端部周辺に大きな応力集中が発生する。そのためスタッドを有するリンクはスタッドにより曲げ変形を抑制し、応力集中を緩和させることを意

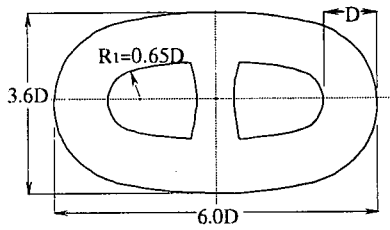


図-1 従来型リンク

図してデザインされたものである。一方、図-2に示すような直線部と曲がり部からなる新型リンクが提案されている。このリンクはスタッドがないことで鋼重が軽くなり、大水深での各種恒久的生産設備を目的とした海洋構造物の係留に適している。新型リンクは直線部の応力分布を純引張状態に近づけることにより応力集中を軽減させることを意図してデザインされたものである。以後、便宜上スタッドを有するリンクを従来型(図-1:conventional chain)、直線部と曲がり部からなるリンクを新型(図-2:new chain)と呼ぶ。

3. BEMによる定式化

(1) 基礎式

解析対象とする新型、従来型の各リンクは微小変形に基づいて均質・等方かつ線形な弾性体と仮定してモデル化する。各リンクの基礎式(釣合方程式、構成則、変位-ひずみ関係)はそれぞれ次のように与えられる。

$$\nabla \cdot \tau + \rho b = 0 \quad (1)$$

$$\tau = \lambda \text{tr} \epsilon \mathbf{1} + 2\mu \epsilon \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \mathbf{u} \nabla) \quad (3)$$

ここで、 τ は応力テンソル、 ϵ はひずみテンソル、 $\mathbf{u}$ は変位ベクトルを表し、 $\mathbf{b}$ は物体力、 ρ は密度、 λ と μ はLamé定数である。また、 tr は対角部、 ∇ は勾配作用素、 $\mathbf{1}$ は単位テンソルを表す。

(2) 境界積分方程式

前節に基づく弾性体の基礎式をグリーンの定理を用いて境界積分方程式に変換する。解析対象とする領域境界を s 、境界上の変位と表面力を $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{t}$ として境界積分方程式は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(\mathbf{x})\mathbf{u}(\mathbf{x}) &= \int_s \mathbf{S}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\mathbf{t}(\mathbf{y})ds_y \\ &- \int_s \mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\mathbf{u}(\mathbf{y})ds_y \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{S}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ は基本解、 $\mathbf{D}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ は基本解 $\mathbf{S}$ により定義される二重層積分核、 $\mathbf{C}$ は二重層積分核の外部極

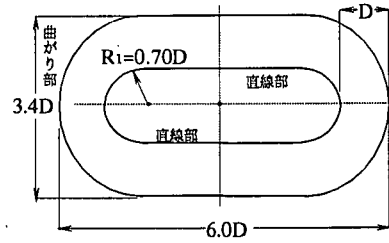


図-2 新型リンク

限である自由項である。なお、式(4)において物体力に関する項は無視した。

(3) 数値計算法

式(4)の境界積分方程式を評価するため、境界を有限個の要素に分割し数値積分を行う。本解析ではリンク全境界を要素分割し、一定要素を用いて離散化を行った。離散化後の境界積分方程式は次のように書ける。

$$\bar{\mathbf{D}}\mathbf{u} = \mathbf{S}\mathbf{t} \quad (5)$$

上式 $\bar{\mathbf{D}}$ の上に付したバーは境界上の二重層核の積分値にフリーターム $\mathbf{C}$ を加えたことを意味している。本解析では上式の右辺第二項の表面力 $\mathbf{t}$ に荷重载荷としての境界条件を与える。なお、上式を解くことによって得られた境界上での解 $(\mathbf{u}, \mathbf{t})$ を共偏微分することにより境界上での縁応力 $\sigma_{\theta\theta}$ を算定することが可能である。また、領域内部の変位、応力も境界上の解を用いて積分表現される。

4. 数値計算

(1) チェーンリンクの数値計算モデル

腐食と摩耗からなる衰耗を含む従来型、新型の数値計算モデルを図-3、4に示す。各図中、 x_1 、 x_2 は衰耗を含むリンク形状全体の座標系である。またリンク内側端部、外側端部をそれぞれpoint A,Bと定義する。調査結果より衰耗は正弦関数形状で近似できるため³⁾、本解析ではリンク内側曲がり部境界の健全な形状に対して次式のような衰耗が発生すると仮定した。

$$f(\theta) = d \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\theta_0}\right) \quad (6)$$

ここで、 d はリンク内側端部の衰耗深さ、 θ は曲がり部内側の任意な角度、 θ_0 は衰耗限界の角度である。 θ_0 は衰耗範囲を L 、チェーン内径を R として次式のように表される。

$$\theta_0 = \sin^{-1}\left(\frac{R}{L}\right) \quad (7)$$

式(6)、式(7)より、衰耗を含むリンク形状全体の座標系 x_1 、 x_2 は健全なリンク形状を規定する座標系 $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$

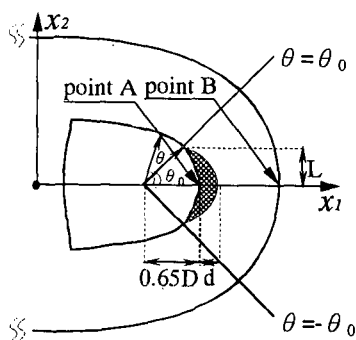


図-3 従来型の数値計算モデル

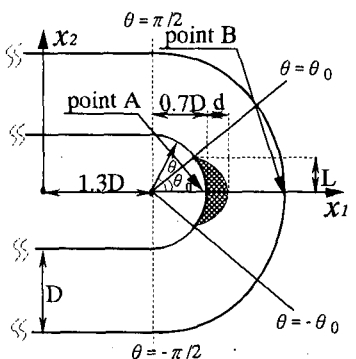


図-4 新型の数値計算モデル

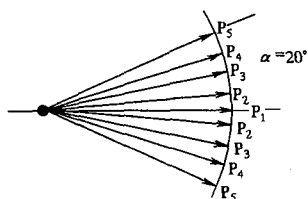


図-5 荷重載荷分布

表-1 荷重載荷条件

作用点	作用点の角度 θ (deg)	x_1 方向 (kN)	x_2 方向 (kN)
P1	0	155.21	0.00
P2	5	295.25	46.76
P3	10	251.13	81.59
P4	15	182.47	92.98
P5	20	95.92	69.70

表-2 数値計算ケース

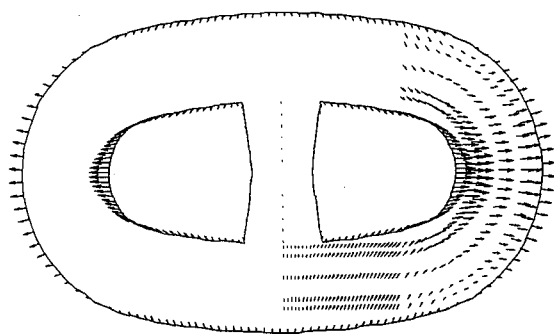
ケース名 新型	ケース名 従来型	衰耗深さ d (mm)	衰耗範囲 L
CASE-A1	CASE-B1	0	0
CASE-A2	CASE-B2	5	0.5D
CASE-A3	CASE-B3	10	0.5D
CASE-A4	CASE-B4	5	0.6D
CASE-A5	CASE-B5	10	0.6D

D: チェーン径 (76mm)

を用いて以下のように表される。

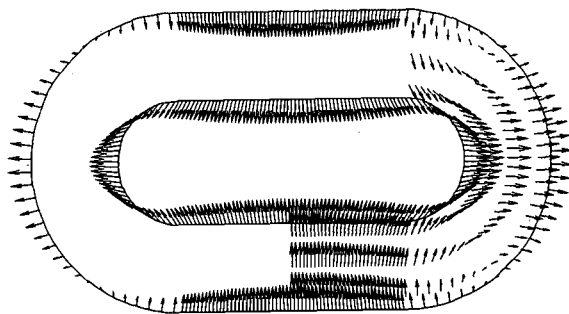
$$x_1 = \bar{x}_1 + f(\theta) \quad (8)$$

Disp. Scale
0.0 1.0 (cm)



a) 従来型 CASE-A1

Disp. Scale
0.0 1.0 (cm)



b) 新型 CASE-B1

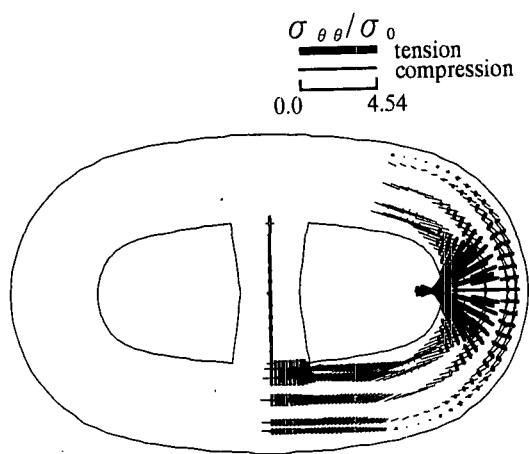
図-6 変位分布状態

$$x_2 = \bar{x}_2 \quad (9)$$

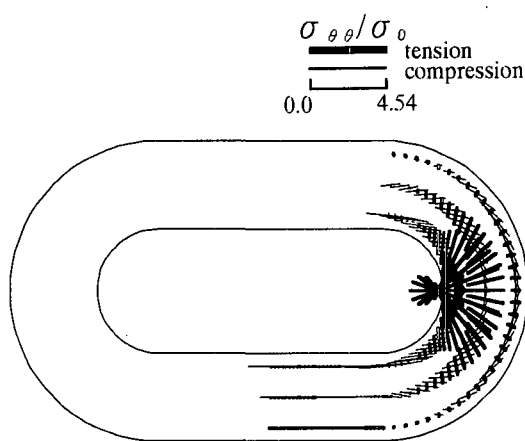
リンクの物性値は剛性 E に鋼材として 210GPa, ポアソン比 ν に 0.3 を与えた。荷重条件は各リンク左右曲がり部内側に表-1, 図-5 に示すような荷重を作用させた。衰耗深さは G3 リンクの 10 年経過において 10mm 程度, その範囲はコモリンク内径 D の半分程度であることが海洋調査より報告されており³⁾, これを基に表-2 に示ような数値計算ケースを設定した。

(2) 数値計算結果

図-6 に従来型 (CASE-B1), 新型 (CASE-A1) の健全な場合における各リンクの変位分布を示す。図中, 変形はベクトル表現されている。まず, 従来型ではスタッドがあるため変形は曲がり部に集中して発生しており, 曲がり部において変位がほぼ 0 となる変曲点がリンク内側, 外側ともに $\theta = 50^\circ$ 程度において見られる。また, point A 点での水平方向変位は point B 点の約 1.35 倍発生している。一方, 新型では直線部ならびに曲がり部のリンク全体において変形が発生している。直線部では曲げ変形が生じており, この部分における境界上の接線方向応力はリンク内側で引張り, 外

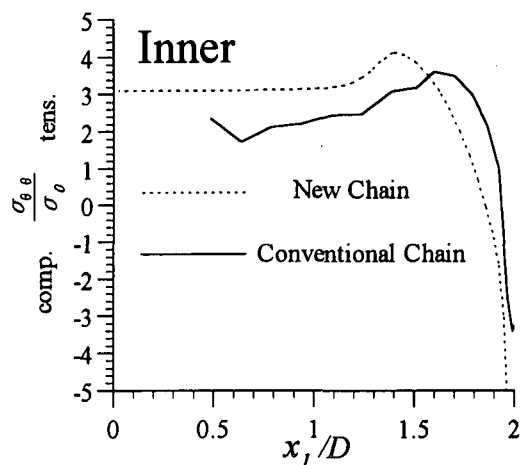


a) 従来型 CASE-A1

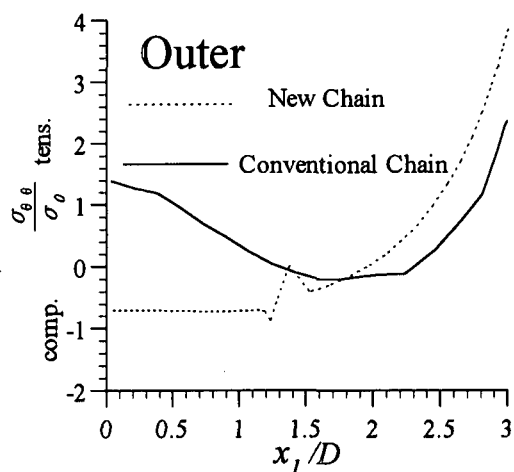


b) 新型 CASE-B1

図-7 主応力分布状態



a) リンク内側 CASE-A1, CASE-B1



b) リンク外側 CASE-A1, CASE-B1

図-8 接線方向応力比の分布 CASE-A1, CASE-B1

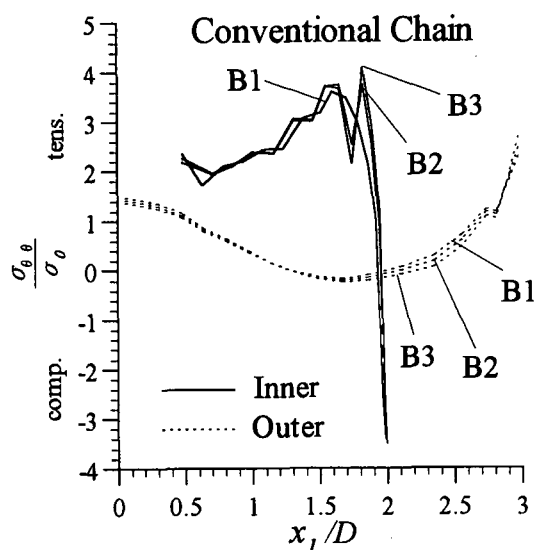
側で圧縮応力が発生することが推察される。また、この新型においても曲がり部においてリンク内側、外側ともに $\theta = 50^\circ$ 程度において変位がほぼ0となる変曲点が見られた。新型においてはリンク内側端部point A点での水平方向変位は外端部point B点の約1.4倍発生している。

図-7に従来型(CASE-B1)、新型(CASE-A1)の健全な場合における各リンクの内部応力分布を示す。図中、 σ_0 は载荷した水平方向の荷重(196kN)をリンク断面積で除したものである。なお、応力は主応力表現されており、細い実線は引張り、太い実線は圧縮を表している。従来型、新型ともに曲がり部では放射状に圧縮応力が分布している。また、新型の直線部では曲げ変形から推察されたようリンク内側、外側それぞれの近傍で引張、圧縮応力が発生している。従来型におけるスタッド部分での応力は鉛直方向に様な圧縮応力が発生している。

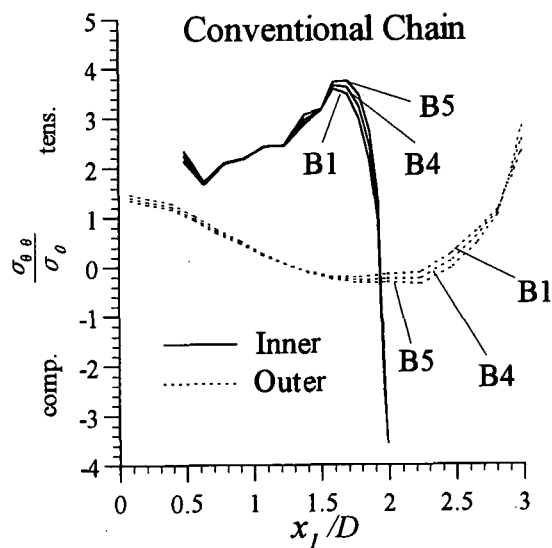
図-8に従来型(CASE-1B)、新型(CASE-1A)のリンク境界上(リンク内側:inner, 外側:outer)における接

線方向応力比($\sigma_{\theta\theta}/\sigma_0$)の分布状態を示す。図より、リンク内側における最大引張り応力の発生位置は、従来型では $x_1/D = 1.6$ 付近、新型では $x_1/D = 1.4$ 付近であり、従来型と新型では最大引張り応力の発生する位置が異なることがわかる。この最大引張り応力が発生する位置は新型ではリンク内境界が直線部から曲がり部に移行する周辺である。この最大引張り応力はその発生位置より x_1/D が増加するにしたがって各リンクとも減少し、圧縮応力の最大値がリンク端部point Aにおいて発生している。一方、リンク外側では各リンクとも最大引張りが発生する位置はリンク端部のpoint Bである。 $x_1/D = 0 \sim 1.3$ において、新型では一定の圧縮応力が発生している。しかし、その部分における従来型では引張応力が減少する傾向にあり、 $x_1/D = 1.6 \sim 2.3$ 付近において応力比がほぼ0となる部分がある。また、従来型のリンク外側の応力分布は引張り応力が卓越した応力分布となっている。

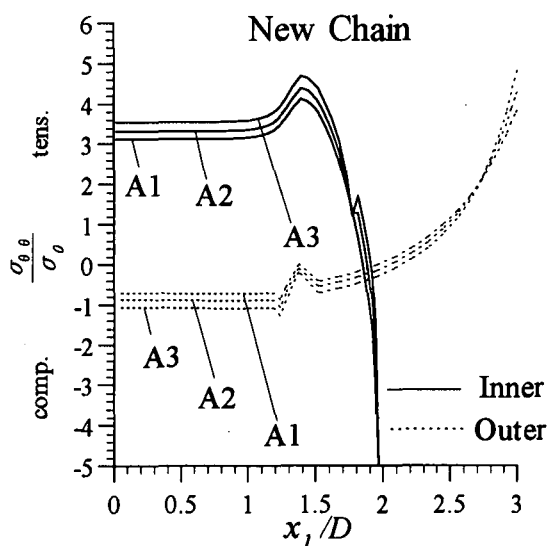
図-9に衰耗範囲が $0.5D$ における従来型(CASE-B1,B2,B3)、新型(CASE-A1,A2,A3)のリンク境界上



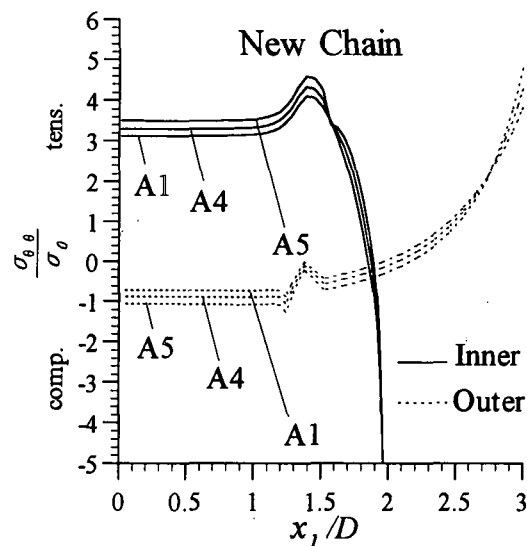
a) 従来型 CASE-B1, CASE-B2, CASE-B3



a) 従来型 CASE-B1, CASE-B4, CASE-B5



b) 新型 CASE-A1, CASE-A2, CASE-A3



b) 新型 CASE-A1, CASE-A4, CASE-A5

図-9 衰耗深さの変化に対する接線方向応力比の分布 (\$L = 0.5D\$)

図-10 衰耗深さの変化に対する接線方向応力比の分布 (\$L = 0.6D\$)

(内側, 外側)の接線方向応力比の分布状態を示す。図中, 実線はリンク内側, 点線はリンク外側の接線方向応力比を表している。まず, 従来型において, 最大引張りにおける応力比はリンク内側, 外側ともに衰耗深さが増加するにともなって増加する傾向にある。また, 新型においてもリンク内側, 外側ともに最大引張り応力における応力比の値は衰耗深さが増加するにともなって増加する傾向にある。なお, 各チェーンとも圧縮応力が最大となる位置はリンク内側端部 point A であり, その応力比の値は衰耗深さが深いほど大きな値を示している。

図-10に衰耗範囲 \$L\$ が \$0.6D\$ における従来型 (CASE-B1, B4, B5), 新型 (CASE-A1, A4, A5) のチェーン境界

上 (リンク内側, 外側) における接線方向応力比の分布状態を示す。従来型, 新型ともに最大引張りが発生する位置と大き, 分布特性は衰耗範囲が \$0.5D\$ における場合とほぼ同様であり, 最大引張りにおける応力比はリンク内側, 外側ともに衰耗深さが増加するにともなって増加する傾向にある。

図-11に各数値計算ケースにおいて接線方向応力比 (引張り) の最大値 (\$\sigma_{\theta\theta\max}/\sigma_0\$) を応力集中係数 \$K_t\$ と定義し, 衰耗深さ \$d\$ との関係を示す。図より, 従来型, 新型ともに衰耗深さが増加するにともなって応力集中係数は増加する傾向にある。新型では各衰耗範囲ともに衰耗深さ \$0 \sim 6\text{mm}\$ 程度まではリンク内側での応力集中係数はリンク外側に比較し大きな値を示しているが,

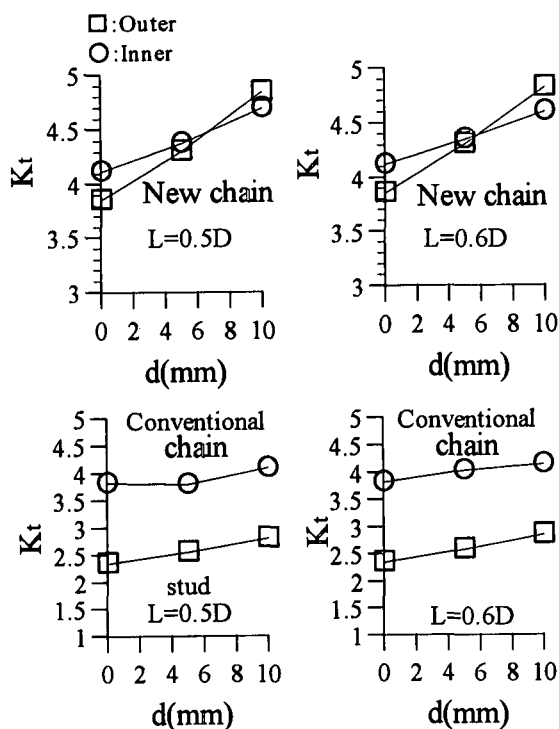


図-11 磨耗深さと応力集中係数の関係

磨耗深さがそれ以上の場合にはリンク内側より外側における応力集中係数のほうが高い値を示す傾向にある。しかし、この新型においては内側と外側の応力集中係数の値はほぼ同程度であり、部材が有効に働いているといえる。一方、従来型では各磨耗範囲ともに応力集中係数は常にリンク内側のほうがリンク外側より高い値を示しており、各ケースにおいて約1.6倍程度リンク内側の応力集中係数はリンク外側に対して大きい。

5. まとめ

本研究では疲労強度を支配する力学的要因(応力集中)に着目し、チェーンリンクの磨耗による形状変化が応力集中の発生特性に与える影響を明らかにした。本検討ではリンク部にスタッド有するチェーンリンクならびに直線部が平行な新型チェーンリンクの二種類のアンカーチェーンを対象とし、引張り荷重載荷時における二次元静弾性解析を境界要素法による数値計算法により行った。解析結果よりリンク境界上の接線方向応力比ならびにその応力比の最大値を応力集中係数と定義して、磨耗による形状変化とそれらの関係を

明らかにした。本検討により以下のような知見が得られた。

(1) 従来型はスタッドがあるため変形は曲がり部に集中して発生する。新型では直線部ならびに曲がり部のリンク全体において変形が発生し、直線部では曲げ変形が生じる。また、各リンクとも曲がり部において $\theta = 50^\circ$ 程度の位置で変位がほぼ0となる変曲点が見られた。

(2) 従来型と新型ではリンク内側における最大引張り応力(応力集中係数)の発生位置は異なる。また、各リンクとも内側における最大引張り応力はその発生位置より x_1/D が増加するにしたがって減少し、圧縮応力の最大値がリンク端部 point A において発生する。リンク外側では各チェーンとも最大引張り応力が発生する位置はリンク外側端部の point B である。

(3) 従来型と新型ともに磨耗深さが増加するにともなうて応力集中係数は増加する傾向にある。新型では各磨耗範囲とも磨耗深さ0~6mm程度まではリンク内側での応力集中係数がリンク外側に比較し大きな値を示した。しかし、磨耗深さがそれ以上の場合リンク内側より外側における応力集中係数のほうが高い値を示した。一方、従来型では各磨耗範囲ともに応力集中係数は常にリンク内側のほうがリンク外側より高い値を示し、各ケースともに約1.6倍程度リンク内側の応力集中係数はリンク外側に対して大きい。

(4) 本解析結果における応力集中係数は磨耗深さ10mmにおいて従来型で最大4.1、新型で最大4.8であった。これらの値は既往の研究で行われたFEM解析による結果³⁾⁴⁾($K_t = 2.8 \sim 3.4$)に比較し高い値を示している。

参考文献

- 1) 征矢勇夫：局部応力集中と構造的応力集中を考慮した溶接止端部の疲労強度評価法，日本造船学会論文集，第180号，pp.509-514，1996。
- 2) C. A. Brebbia：境界要素法入門，培風館。
- 3) 鈴木信一：係留用ハイテンチェーンの研究，東京工業大学，学位論文，1988。
- 4) DNV：Determinate of stress distribution in chain link, ANCHOR CHAIN CABLES OFFSHORE, pp24-37, 1980。

(1999.4.19 受付)