揚重機用リンクチェーンの三次元 弾塑性有限要素解析と強度評価*

広島 哲^{*1}, 沢 俊行^{*2}

Three-Dimensional Elastoplastic Finite-Element Analysis for Link Chains in Chain Hoist

Tetsu HIROSHIMA and Toshiyuki SAWA

This paper deals with a three-dimensional stress analysis for link chains subjected to tensile loads. The analysis was done using the finite-element method to examine the strength of the link chains. The effects of the dimensions of link chains on Misess's stress at the border between the curved part and the straight part in the link, and at the outer part, of which the inner part contacted with the inner part of the other link, were shown through numerical calculations. For verification, photoelastic experiments and measurement of strain were performed. The analytical results were in fairly good agreement with the experimental results. It was clarified that the strength of link chains can be improved by optimizing the link pitch, the link width, shape of the link section and compressed depth. Discussion is also presented on the estimation of the strength of the link chain subjected to tensile loads.

Key Words: Link Chain, Finite-Element Method, Three-Dimensional Stress Analysis, Tensile Load, Misess's Criterion, Elastoplastic Analysis, Strength Evaluation

1. 緒 言

一般に丸棒を素材とした円形状に形づくられたリンクが相互に連結されている鎖を JIS B 8812⁽¹⁾ ではリンクチェーンと名づけている。用途によって各種のチェーンに分類できるが、その中で特に強度と寸法精度が必要とされるのは揚重機用チェーンのように滑車(ロードシーブ)などのかみあいが必要なリンクチェーンである。これらのリンクチェーンは製品の軽量化に伴い、いつそうの小形化および高強度化が望まれている。これまでにリンクチェーンに関してはリンクチェーンの疲労特性⁽²⁾、衝撃引張り⁽³⁾、破壊靱性と疲労き裂伝ば特性⁽⁴⁾、ハイテンチェーンのフラッシュ溶接部の欠陥発生要因と防止技術⁽⁵⁾、さらに海洋構造物の係留に用いられているチェーンの耐久性⁽⁶⁾などについて研究がなされている。

しかし、今後のリンクチェーンのより合理的な設計のためにも荷重が作用したときのリンクチェーン内部の応力分布を明らかにする必要があるが、従来このよ

うな研究はほとんどなされていないようである。このため、高い強度と信頼性が要求されるにもかかわらず、チェーンの設計は経験によるところが多く、より詳細な検討が必要となってきた。そこで、本研究ではリンクチェーン内部の応力を三次元有限要素法により弾塑性解析し、リンクチェーンの強度予測および形状の最適化について解析および実験により検討し、今後の合理的なリンクチェーンの強度設計の基礎的資料を提供することを目的としている。なお、本論文において以後、リンクチェーンを単にチェーンと呼ぶこととする。

2. 理 論 解 析

2・1 解析モデル 図1にチェーン形状を示す。チェーンの線径を d 、ピッチを p 、外面幅を b 、中押し量を δ とし⁽¹⁾、チェーンの縦弾性係数、ポアソン比を E 、 ν とする。本解析においてはチェーン溶接部の直径を他の部分と同一とみなし解析を行った。

2・2 チェーンの応力解析 図1のチェーンの静的引張荷重作用時の応力解析は汎用有限要素法解析プログラム KSWAD/FEM-SOLVE(クボタコンピュータ)を使用し、ワークステーション(クボタコンピュータ, MIPS-RS 3330)により計算を行った。図2(a)は

* 原稿受付 平成5年2月18日。

*¹ 正員, (株)キトー(〒409-38 山梨県中巨摩郡昭和町築地新居2000)。

*² 正員, 山梨大学工学部(〒400 甲府市武田4-3-11)。

計算の簡略化のためリンクチェーンの対称性を考慮し、1個のチェーンの1/4部分を解析対象とした場合の有限要素モデルの要素分割の一例を示す。要素は1次要素で中心部分が五面体立体要素、他の部分は六面体立体要素によって構成されている。境界条件は図2(b)に示すように対称面を面に対し垂直方向に拘束し、チェーン同志の接触部分に面分布荷重を作用させた。なお、面分布荷重の作用領域は引張試験で破断したチェーンの接触部における圧痕の寸法測定結果を用いた。また、要素数は約2000であった。

2・3 チェーンの内部応力解析と強度予測 図3に示すように、チェーンに引張荷重を作用させたときのチェーンの破断箇所は溶接部(A)、肩部(B)、平行部(C)に大別される。今までの著者らの実験によるとJIS B 8812⁽¹⁾に規定され一般に常用されるMn合金鋼浸炭チェーンの破断箇所はほとんどが(B)であり、溶接部からの破損はまれである。そこで、本研究では有限要素法による弾塑性解析で断面(B)のミーゼス応力を求め、断面(B)の全要素のミーゼス応力がチェーン材料の引張強さに達したときをチェーンの強度に達し

たとする。ここで、解析に用いた材料定数を表1に示す。これらの材料定数は実際のチェーンと同じ焼入れ条件で製作した線径11.2 mmの単丸棒で引張試験を行い、長手方向と半径方向のひずみをひずみゲージで測定することにより求めた。また、図4は長手方向のひずみと公称応力の関係を示す。図中Cは応力-ひずみ線図において降伏応力を0.2%耐力とし、弾・線形塑性体に近似したときの降伏後の傾きを示す。本チェーン材は降伏後かなり加工硬化することが示されており現在、延性金属材料の降伏条件に最もよく適合すると予想されるミーゼスの降伏条件⁽⁷⁾を用いた。また、応力-ひずみ線図を $\sigma_{0.2} = \sigma_{\max} = 1.59 \text{ GPa}$, $C=0$ として弾完全塑性体に近似し、弾線形塑性体の場合と同様にチェーンの強度を予測する。

2・4 チェーン形状の検討 1リンクのチェーンに応力-ひずみ線図における弾性域の引張荷重を作用させた場合のチェーンの形状の変化がチェーン強度に及ぼす影響について有限要素法によって検討する。具体的にはピッチとチェーン線径の比 p/d 、外面幅と線

表1 解析に用いた材料定数

Young's modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Yield stress $\sigma_{0.2}$ (GPa)	C (GPa)	Tensile strength $\sigma_{\max}$ (GPa)
210.5	0.265	1.296	1.464	1.59

図1 チェーン形状

図3 チェーンの破断箇所の分類

(a) 要素分割の一例

(b) 境界条件

図2 チェーンの有限要素モデルの要素分割の一例と境界条件

図4 チェーン材丸棒の応力-ひずみ線図

径の比 b/d , 中押し量とチェーン線径の比 δ/d , チェーン断面形状を変化させた場合についてそれぞれミーゼス応力を計算し, チェーン強度向上のための最適形状について検討する。

3. 実験方法

解析と実験結果の比較を行うためひずみ測定実験と光弾性実験を行い, また実際に揚重機に使用されている浸炭チェーンの引張破断試験によりリンクチェーンの強度予測について検討する。

3.1 ひずみ測定実験 解析の妥当性を確認するために実験より求めたひずみと有限要素法より求めたひずみの比較検討を行う。図5(a)に示すように9リンクの一連のチェーンに引張荷重 12.26 kN を作用させたときの図5(b)の位置のひずみを抵抗線ひずみゲージ(共和 KFG-2-120-C 1-11)を用いて測定した。なお, 実験に用いたチェーンの形状と機械的性質および化学的性質を表2および表3に示す。

3.2 光弾性実験 ひずみ測定実験と同様に, 内部応力の解析の妥当性を確かめるために, 1リンクのチェーンに引張荷重が作用する場合の光弾性実験を行

表2 リンクチェーンの諸元

chain sizes(mm)				Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
p	d	b	δ		
34.3	11.42	37.5	0.16	210.5	0.265

表3 リンクチェーンの化学成分

Materials	C	Si	Mn	P	S
wt%	0.23	0.19	1.26	0.016	0.01

(a) ひずみ測定実験概要 (b) ひずみゲージの位置

図5 ひずみ測定実験とひずみゲージの位置

った。表4は光弾性実験に用いた試験片の寸法および機械的諸元を示す。チェーンの材質はエポキシ樹脂で, 引張荷重 17.9 N を作用させ応力を凍結した後厚さ 6 mm にスライスした [図6(b)参照]。

3.3 リンクチェーンの引張破断試験 表5は実験に用いた5種類のチェーンの諸元を示す。なお, チェーンの化学成分は表2と同じである。試験本数は各30本とし, チェーンに引張速度 3 mm/min で引張荷重を加え, 材料試験機により破断荷重を測定した。

4. 解析結果および実験結果との比較検討

4.1 引張荷重を受ける場合のチェーン内の応力分布と強度予測

図7は表5のサンプル No.5 のチェーンに 126.1, 142.7 および 175.8 kN の荷重が作用した場合の弾塑性解析を行ったときの図3に示す断面(A), (B)および(C)におけるミーゼスの等価応力がチェーン材料の引張強さ(1.59 GPa)に達した要素の

表4 光弾性実験用リンクチェーンの寸法および機械的特性

chain sizes(mm)				Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
p	d	b	δ		
34.3	11.2	37.5	0.16	58.9	0.345

表5 引張試験に用いたチェーンの諸元

Sample No.	chain sizes (mm)			
	p	d	b	δ
1	15.1	5.0	16.8	0.13
2	19.1	6.3	21.1	0.0
3	21.3	7.1	23.8	0.23
4	30.3	10.2	33.5	0.2
5	34.3	11.2	37.5	0.16

(a) 負荷装置 (b) スライス後の試験片形状

図6 光弾性実験負荷装置とスライス後の試験片形状

範囲を示している。この図より、断面(B)で荷重 175.8 kN のとき、要素の 100% が引張強さに達しており他の断面よりも早く破断を引き起こすことが予想される。これは実際のチェーンの破断箇所とほぼ一致しており、チェーンの破断荷重値ともかなりよく一致した。これより、断面(B)の全要素のミーゼス応力が引張強さに達したときの負荷をそのチェーンの最大引張荷重とする。図 8 は上記の条件で他のチェーン(表 5 中のサンプル No. 1~4)の引張強さを予測した結果と実験結果の比較を示す。横軸はチェーンの線径 d を示している。縦軸はチェーンの最大引張荷重を断面積 $[2 \times (\pi d^2)/4]$ で除した値を示す($P_{\max}$: 最大引張荷重, d : チェーン線径)。ここで、破線は材料特性を弾完全塑性体と仮定した場合の解析結果を示している。実線の弾線形塑性体と仮定した場合に比べて引張強さが小さくなり、実験値との差が大きくなる。材料特性を弾線形塑性体とし、ミーゼス応力によって引張強さを評価することで、十分引張強度が予測できることがわかる。

さらに、一例として $\phi 11.2$ mm チェーン(表 5 のサンプル No. 5)の負荷前の残留応力測定を X 線回折装置を用いて行ったところ⁽⁸⁾、チェーン表面には最大

0.2 GPa の圧縮応力が、チェーン内部には最大 0.2 GPa の引張応力が残留していることがわかった。チェーン加工によるチェーン内部および表面での残留応力が図 8 に示す実験値と解析値の差の原因の一つと推測される。

4.2 チェーン形状が強度に及ぼす影響 形状の最適化のため、破壊の起点となるチェーン外周面頂点(図 9~12 中の①の位置)とチェーン内周面 R 部と平行部の境界(図 9~12 中の②の位置)のミーゼス応力がともに最小となるよう解析を行う。

4.2.1 ピッチと線径の比 (p/d) の影響 解析では負荷は弾性域内とした。図 9 はチェーン外周面頂点①の位置とチェーン内周面 R 部と並行部の境界②の位置における無次元化されたミーゼス応力 σ_M/σ_n と p/d の関係を示す。ただし、 σ_n はチェーンの平行部に

図 7 各断面のミーゼス応力が引張強さに達した要素の範囲

図 8 引張強さの予測結果と実験結果の比較

図 9 p/d がミーゼス応力に及ぼす影響

おける公称応力($=F/2S$, F : 負荷荷重, $S: \pi d^2/4$)とする。この図より $p/d=3.25$ のときチェーン外周面頂点とチェーン内周面 R 部と並行部の境界の無次元化されたミーゼス応力がともに 4.0 となり, $p/d=3.25$ の場合が最も効率的にミーゼス応力が減少すると推測される。なお, $b/d=3.25$ および $\delta/d=0$ の値はそれぞれ一定とした。

4・2・2 外面幅と線径の比 (b/d) の影響 図 10 はチェーン外周面頂点①の位置とチェーン内周面 R 部と並行部の境界②の位置における無次元化したミーゼス応力 σ_M/σ_n と b/d の関係を示す。この図より b/d の増加に伴いチェーン外周面頂点とチェーン内周面 R 部と並行部の境界の無次元化したミーゼス応力が増加することがわかる ($\delta/d=0$, $p/d=3$ 一定)。

4・2・3 中押し量と線径の比 (δ/d) の影響 図 11 はチェーン外周面頂点①の位置とチェーン内周面 R

部と並行部の境界②の位置における無次元化したミーゼス応力 σ_M/σ_n と δ/d の関係を示す。この図より $\delta/d=0.05$ のときチェーン外周面頂点とチェーン内周面 R 部と並行部の境界の無次元化したミーゼス応力がともに 4 となり, $\delta/d=0.05$ の場合が最も効率的にミーゼス応力が減少すると推測される。

4・2・4 チェーン断面形状の影響 チェーンの断面をだ円と仮定した場合, 長直径と短直径の比 d_b/d_a がミーゼス応力の変化に及ぼす影響を検討した。図 12 はチェーン外周面頂点①の位置とチェーン内周面 R 部と並行部の境界②の位置における無次元化したミーゼス応力 σ_M/σ_n と d_b/d_a との関係を示す。計算にあたり断面積と内面幅(外面幅から線径の 2 倍を引いた値)をそれぞれ一定とした。この図より R 部と平行部の境界のミーゼス応力は $d_b/d_a=1.05$ で最小になり最も効率的にミーゼス応力が減少すると推測される。

図 10 b/d がミーゼス応力に及ぼす影響

図 12 チェーン断面形状がミーゼス応力に及ぼす影響

図 11 δ/d がミーゼス応力に及ぼす影響

図 13 ひずみ測定実験と解析結果の比較

図 14 等色線図

4.3 ひずみ測定実験, 光弾性実験と解析結果の比較

4.3.1 ひずみ測定実験と解析結果の比較 図 13 は 3.1 節のひずみ測定実験と解析との比較結果を示す。縦軸はひずみを, 横軸は図 5 (b) に示す角度を表す。解析において寸法は実験に用いたチェーンに対応させ, 縦弾性係数 E , ポアソン比 ν はそれぞれ 210.5 GPa, 0.265 とした。実線は解析結果を○印が実験値を示す。この図より解析結果と実験結果はかなりよく一致していることがわかる。

4.3.2 光弾性実験と解析結果の比較 試験片を応力凍結後, 厚さ 6 mm にスライスし偏光を照射して透過した偏光の干渉じま(等色線)を写真撮影することで実験による等色線を測定した(図 14 参照)。図 15 は光弾性実験と解析結果の比較結果を示す。縦軸は接触部から外周部までのスライス面における主応力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) を, 横軸は図 15 に示す接触端部 O からの距離 Y を示している。なお, σ_1, σ_2 は偏光の進行方向に対し垂直な方向の主応力である。解析においてチェーンの寸法は実験と対応させ, E, ν はそれぞれ 58.9 MPa, 0.345 とした。この結果からも解析結果と実験結果はかなりよく一致していることがわかった。

5. 結 言

本研究では, チェーンのより合理的強度設計のためのデータの蓄積およびチェーン強度向上を目的とし, 有限要素法を用いて各形状因子の強度に及ぼす影響について検討し, 次の結果が得られた。

(1) 引張荷重を受ける 1 リンクチェーン内部の応力状態を弾塑性解析し, 荷重の増加とともに進展する

図 15 光弾性実験と解析結果の比較

チェーン内部の塑性域状態をミーゼスの応力に基づいて明らかにし, チェーンの強度を推定した。

(2) 光弾性実験およびチェーンのひずみに関する実験を行い有限要素解析の結果と比較し, 両者はかなりよく一致することを示した。

(3) チェーンの引張試験を行い有限要素法によるチェーンの強度予測結果と比較し, 両者はかなりよく一致することを示した。

(4) チェーン形状のチェーン強度に及ぼす影響を数値的に検討し, チェーン径 d とピッチ, 中押し量, 外面幅の間にはチェーン内部のミーゼス応力が最小となる場合がそれぞれ存在することがわかった。また, 断面形状の検討も行ったところ, 長直径と短直径の比が 1.05 のときもっとも効率的に内部のミーゼス応力が減少すると推測された。

本研究は著者の一人, 広島 哲が平成四年度山梨大学工学部研究生として行った研究であり, 関係各位のご援助をいただいた。ここに謝意を表す。

文 献

- (1) 日本規格協会, JIS ハンドブック(物流), (1992), 707.
- (2) 山田・ほか 3 名, 機論, 53-486, A(1987), 215.
- (3) 茶谷・ほか 2 名, 機論, 54-506, A(1988), 1903.
- (4) 橋内, 圧力技術, 22-1(1984), 2.
- (5) 一山・ほか 3 名, 溶接学会全国大会講演概要 40 集, (1987-4), 234.
- (6) 大津留・ほか 2 名, 船舶技術研究所研究発表会講演集, 46 th, (1985-4), 9.
- (7) 平, 現代塑性力学, (1976), 41, オーム社.
- (8) 三好, 材料, 37-416(1988), 571.