

建設機械の最適設計

弓削康平*¹, 波多野学*²

Optimal design of a construction machine

Kohei YUGE*¹, Manabu HATANO*²

ABSTRACT : Weight reduction of a crusher attached at the tip of an oil pressure shovel machine to destruct a building is very effective to save energy consumption of the whole machine. It is, however, not easy since a crusher is subject to a very heavy load and accordingly a major part of that is exposed to a high equivalent stress. In this paper, a design of an existing crusher is improved to reduce its weight based on the topology optimization algorithm proposed by Bendsøe and Kikuchi, where a given amount of material is laid out so that an objective function may be minimum. Three cases of loading conditions are assumed and the sum of the mean compliance in these cases is set to the objective function. The final design obtained by use of the calculated material layout is proved to save the material by 7%.

KEYWORDS : structural optimization , FEM, design

(Received March 26, 2004)

1. はじめに

近年、建設機械業界ではISO14001（環境マネジメントシステム）の導入など環境保全が重視されるようになり、その一環として建設廃材を工事現場で破碎して路盤材や骨材として再生する自走式破碎機が普及してきている。破碎機のひとつに油圧ショベルのアームの先端に取り付けられ、油圧シリンダーによって作動する小割圧碎機がある。小割圧碎機は、重量が大きいと回転時に油圧ショベル本体が揺れ動いて作業効率が低下してしまう。また、アームの先端が重いことで、動力源に掛かる負荷が大きくなり騒音・振動・排出ガスへの悪影響も生じる。本研究ではこの小割圧碎機の限界軽量設計を最適化解析により試みる。

小割圧碎機は図1に示すようにAのアーム部分とBのボディー部分より構成されており、アーム部分を油圧で動作させることによってコンクリート塊を挟み砕くことができる。ここでは質量約330kgで中空の袋状構造をし

ているAのアーム部分のみを最適化対象とする。

構造最適化手法には、数力所の寸法を決定する寸法最適化、外形を最適化する形状最適化、外形の他に設計領域内部に穴を設けることも許すトポロジー最適化、ビードパターンを決定するトポグラフィー最適化などが挙げられるが、アームの外形は種々の要因から変更が困難なので本研究ではトポロジー最適化手法を適用する。

トポロジー最適化は、図2に示すように許容設計領域と境界条件（拘束と荷重条件）を与え、指定した目的関数が最小となるように許容設計領域に材料を配置する最適化手法であり、BendsøeとKikuchi¹⁾, Suzukiと

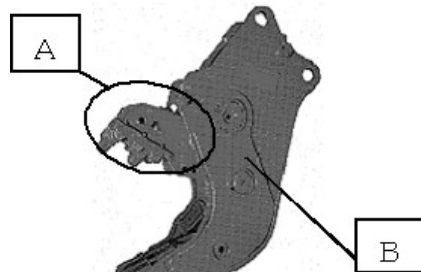


図1 小割圧碎機

*1 機械工学科教授 (yuge@me.seikei.ac.jp)
Professor, Dept. of Mechanical Engineering

*2 機械工学科4年生

Kikuchi²⁾らの研究によって実用的な設計手法として広く用いられるようになった。図2から明らかなようにトポロジー最適化では、許容設計領域を大きくとれば内部の穴の形状に加え、外形も併せて最適化可能である。なお、この最適化では材料密度の分布が解析結果で現れるが実際には実現不可能な中間的な密度も計算で現れるという問題点がある。解析者は得られた結果を概念図と考え、実際に設計可能な構造を検討する必要がある、そこが本研究でも重要となってくる。

トポロジー最適化では、材料の効率的な配置を決定するために許容設計領域を有限要素に分割する。続いて各要素の材料密度を設計変数に、材料の総量を制約条件にしてコンプライアンスなど指定された目的関数が最小になるよう最適性基準法などを用いて設計変数を決定する。要素毎に設計変数を有するため、その数が非常に多いことが寸法最適化などと大きく異なる点である。材料密度を変化させたときの剛性を前述の文献^{1), 2)}では複合材料の解析法である均質化法によって計算する。これに対してYang³⁾は剛性が密度のべき乗に比例する仮想的な材料を仮定する方法を提案しているが両手法は本質的には同じ考え方である。著者らはこれまでにトポロジー最適化のプログラムを作成し、そのアルゴリズムに関する研究を実施してきた⁴⁾が、本研究では3次元CADのデータからの要素分割が容易で、4面体要素、6面体要素など様々な要素による最適化が実施できるAltair Engineering社の商用ソフトHyperMeshを利用した。HyperMeshは3次元CADデータからの解析用メッシュ作成機能、作成したメッシュによる解析機能および最適化機能を有している。

2. 解析モデルと最適化条件

解析対象アームの主要寸法と境界条件を図3に示す。アームは片側に歯がついているために非対称構造をしておりピンを通すための穴が2カ所ある。端部側の穴に通されたピンによってアームは図1中のボディBと連結さ

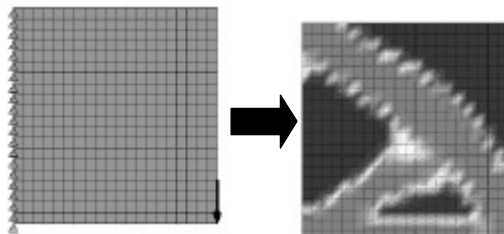


図2 トポロジー最適化

れる。また、中央部の穴にはピンを介して油圧ポンプの荷重が作用する。材料は、SCMn2B（低マンガン鋼製品焼入れ）であり材料定数としてヤング率210GPa、ポアソン比0.3、降伏応力440MPaを解析に用いた。

このアームを水平から43.73[deg]傾け、油圧シリンダー一回転軸受けにX軸から152.39[deg]の方向から1570kN（160tonf）の力を加える。拘束条件として、アーム回転軸（図3）中心を単純支持することに加え、次の3ケースを考える。

- ケース1：左右の歯先（図3）を共に固定
- ケース2：左歯固定
- ケース3：右歯固定

ケース1は破碎対象を両歯で挟んだ状態に相当し曲げ変形が生じる。一方、ケース2、3は破碎対象を片歯で挟んだ状態に相当し、曲げ変形とねじり変形が連成する。

図4に、モデル化されたアームの要素分割と肉抜きを施したい領域（黒色）、形状を変更せずに残したい領域を非設計領域（灰色）を示す。ここで設計領域の体積は、全体積の5割を占めている。

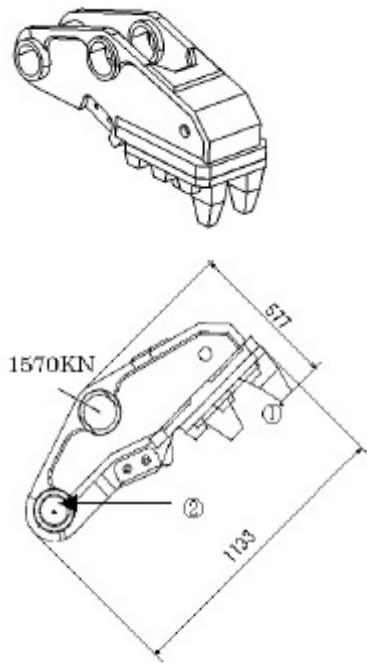


図3 解析対象と境界条件

本研究では上述の境界条件の下で弾性範囲内に応力を抑えながら最も軽量なデザインをめざす。使用するHyperMeshは塑性変形を考慮できないため、制約条件として、設計領域の肉抜き体積の割合 V を $V=30\%$ から10ポイントずつ増やしながらか最適化を実施し、最適化後のデザインに降伏応力を超える領域が生じないかを調べて肉抜き量を決定することとした。

目的関数は、3つの荷重ケースのコンプライアンスの和

$$w = f_1 \cdot u_1 + f_2 \cdot u_2 + f_3 \cdot u_3$$

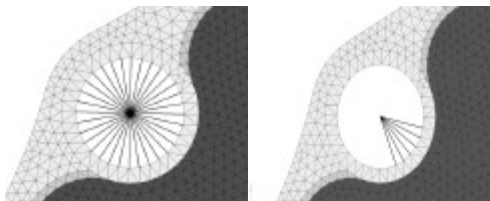
と設定し、これが最小となるよう最適化を実施する。

3. 軸受け拘束条件の検討

解析対象としたアームは、ピン穴付近が油圧のを受けるピンとの接触によって大きく変形する可能性があるが、HyperMeshは接触を解析する機能を持たない。そこでピン穴中心において単純支持条件が満たされるようにするためにピン穴を剛体要素で埋め、その面内回転変位を自



図4 解析モデルと設計領域（黒色部分）

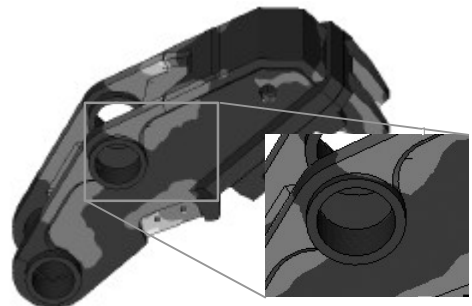


(a) 剛体要素A (b) 剛体要素B

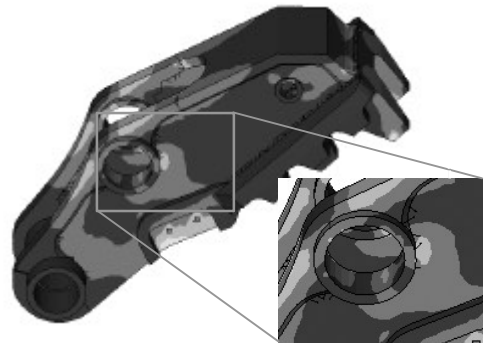
図5 剛体要素形状の検討

由に、並進変位を拘束することにした。最適化に先立ち、剛体要素について図5 (a), (b)に示すように2とおりの形状を検討した。(a)はピン穴を完全に剛体要素で埋めたもので穴は荷重後も真円を保つ。一方、(b)は荷重の方向に対して45[deg]程度の剛体要素を設定したもので、荷重によるピン穴の真円から楕円への変形をある程度考慮することができる。

図6 (a), (b)にそれぞれの計算により得られたMisesの相当応力を示す。真円の剛体要素を用いた(a)の場合、油圧シリンダー回転軸軸受け直下および内面の双方に応力分布が見られないのに対して部分的に剛体要素を用いた(b)では軸受け周りの応力が相当に大きくなっていることが理解できる。



(a) 剛体要素A



(b) 剛体要素B

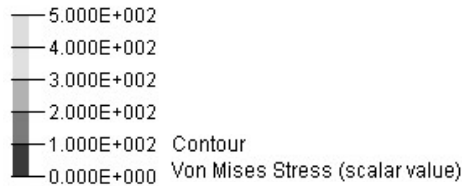


図6 軸受け拘束条件の検討

さらに剛体要素によって接触の影響を考慮する方法の妥当性について接触解析機能を有する汎用有限要素法ソフトANSYS ver7.1を用いて検討した。ただし、ここで使用したANSYSには要素数に制約があるため、板厚を考慮した2次元2分の1解析とした。荷重もケース1と比較できるように荷重1570kNの2分の1である785kNを油圧シリンダー回転軸中心点に加えた。図7に示すのが軸受け部の接触を考慮した解析結果である。剛体要素を用いた図6(b)の解析結果と比較してみると、軸受け周辺の応力分布の傾向はほぼ対応しており剛体要素(b)による解析に大きな問題はないと判断される。以上の考察より以降の最適化解析では剛体(b)の設定によって荷重をあたえることにした。

4. トポロジー最適解析

図8に制約条件をV=50%（空隙がない体積の50%）

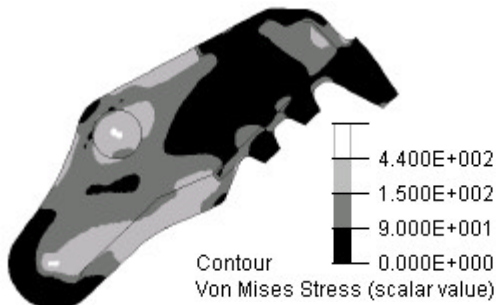


図7 2次元接触解析結果



図8 最適設計解析結果 (V=50%)

の材料とした場合の最適計算の結果を示す。図中、黒色の部分が肉抜き可能となる部分となる。この結果から蓋、側面、底板の肉抜きが可能と判断できる。

この最適設計結果に基づいた各荷重ケースの相当応力分布を図9に示す。ここで肉抜き部分も計算の安定上ごくわずかな材料は残されており応力が発生していることに注意を要する。応力負担の小さい領域は肉抜きされた結果、設計領域内の応力がほぼ等しくなっており、いわゆる全応力設計となっていることが理解できる。しかし一部に降伏応力を超える領域が、ねじりの伴うケース2、3のそれぞれにある。これらは再設計において補強を施すことにより対応することとした。

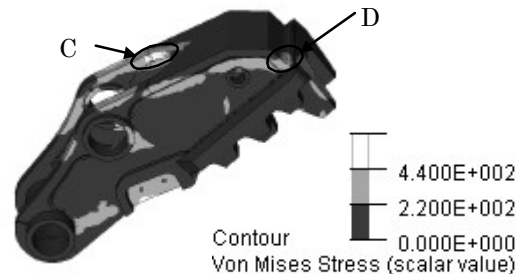
5. 解析結果に基づく修正設計



(a) ケース1



(b) ケース2



(c) ケース3

図9 最適解での相当応力分布(V=50%)

前章で得た肉抜き50%での最適計算結果は材料の密度分布を表す概念設計であるため、ここではこれを参考に肉抜き部分を決定し、最適設計のケース2やケース3で、降伏応力を超える部分（図9(b)中のAおよびB部分、図9(c)のC、D部分）は一部を補強するなど現実の設計に反映させる。

主な設計変更内容を以下に列挙する。

- i. 油圧シリンダー回転軸受け付近の上辺に降伏応力未満ではあるが比較的大きな応力を生じたので側面内側にリブを設ける。（図10A）
- ii. 蓋部分は解析結果を参考にクロス状のテンションバーを配置するデザインとする。
- iii. 底板部分は、底板のコーナー部以外は不要という最適結果を参考に大幅に肉抜きする。
- iv. アーム先端部は、応力集中を緩和するために先端の付け根にテーパを施す。

図11に設計変更し軽量化されたアームを解析して得られた相当応力を示す。降伏応力を超える部分はなくなった。また、肉抜きによる応力集中などの悪影響もなかった。所定の境界条件の下で弾性状態を確保しながら限界軽量化設計を行った結果、初期のモデルが330kgであるのに対して設計変形後のモデルは、306kgであり7.3%の軽量化効果を提案できた。

6. まとめ

本研究ではきわめて大きな応力を受ける建設用破砕機の軽量化を実施した。破砕機は油圧ショベルアームの先端につけるため、その小型化は全体の小型化、省エネルギー化に大きな効果がある。トポロジー最適化計算結果を生かし設計変更したところ7%というかなりの軽量化に成功した。

さらに効率の良い軽量化のためには接触変形や弾塑性変形を考慮した最適化アルゴリズムの拡張が有効であろう。

参考文献

- [1] Bendsoe, M.P. and Kikuchi, N, Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 71 (1988), 197-224.
- [2] Suzuki, K. and Kikuchi, N., A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 92 (1991), 291-318.
- [3] R.J.Yang, C.H.Chuang, Optimal Topology Design Using Linear Programming, *Computers & Structure*, 52 (1994), 265-275.
- [4] 弓削康平, 阿部淳一, 江島晋, 耐衝突部材の3次元トポロジー最適設計, *日本機械学会論文集*, Vol.69-687-A, pp1613-1620, 2003.

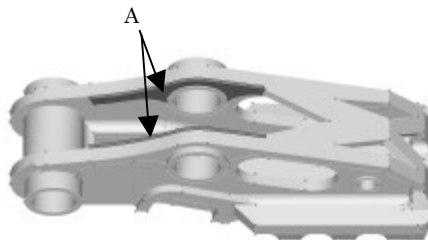


図10 設計案



(a) ケース2



(b) ケース3

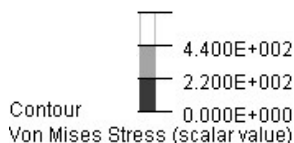


図11 設計案による相当応力