

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

学位論文題目	New Mechanism of Absorption Collision Energy on Rolling-Over Protective Structure (ROPS) Using Compression-Expansion Crash box
氏 名	Zefry Darmawan

This paper clarifies the energy absorption mechanism of the cab frame corresponding to the roll-over protective structure (ROPS) using the compression-expansion thin-walled tube absorbing member. The summary is as follows.

It is important to protect operators from the impact of falls in heavy machinery. As a safety protection a rollover protection structure is applied to the cab frame. The cab is required to absorb the impact energy of a heavy machine fall accident and to keep the operator's survival space at the same time. Therefore, it is necessary for the cab to absorb energy without lowering the rigidity and strength with respect to a predetermined amount of deformation. Also, when deformation cracks occur at the weakest part of the frame, the load decreases rapidly and lost sufficient energy absorption performance. Since it is difficult to obtain various modifications for preventing the bending collapse of the frame and a cast member, while develop the cab to satisfy the ROPS standard for each weight of the heavy machine body. In addition, like the automobile, the energy absorbing members mainly used for absorbing the collision energy at the accident are not used at cab. Development cost and resources are required for each cab applied to ROPS in order to design each heavy machine individually. Simulation based on theoretical analysis improves efficiency by using the finite element method. In this research, we investigate the characteristics of the collapse of the cab frame corresponding to the ROPS standard, without considering the special cross sectional design frame and individual optimized parts to increase performance. A study on new absorption mechanism for improvement also investigates to enhancing performance of ROPS.

Chapter 1 present the research on the ROPS structure of the heavy equipment, the impact absorbing member and the problem of the impact energy absorbing mechanism in the previous research, and the outline of the research in this paper is shown. In chapter 2, the mechanical properties of the materials used for analysis and evaluation, and the properties of the newly proposed compressive expansion type absorbing member and cab frame are shown. In chapter 3, we showed the analysis environment such as the boundary condition of the simulation, the theoretical analysis by finite element method used in this research and the investigation result on ROPS test.

In Chapter 4, the characteristics of the cab frame and the weak points from the evaluation of the load-deformation curve and the energy-deformation curve in the thickness combination of each frame is varied based on the typical 6-post cab frame shape. As a result of specifying the members and parts, local wrinkles which become weak points in the four different regions of the cab frame are shown. The important part in this cab frame is vertical pillar A, C, and H pillars.

Chapter 5, we investigated the bending characteristics of square tubes with expanded compression type energy absorption part for the purpose of preventing bending collapse of the frame member and occurrence of local wrinkles. The collapse form of the square tube was influenced by the thickness of the member and the dimension of the cross sectional area. The deformation mode was clarified into 3 type; side, bottom, and flat collapse. Particularly, in the flat

collapse mode, it was shown that high energy absorption characteristics can be obtained because there is no local buckling.

In Chapter 6, the optimum design shape of the cab frame was investigated based on the results of the stress distribution specified along the three observation points on the square tube cross section. Using the basic shape of 6-post ROPS, the change of the stress and strain of the frame under the different plate thickness condition is investigated using those points. The energy absorption of the cab frame is increased, and at the same time also reduces the local buckling.

In Chapter 7, we propose a new energy absorbing mechanism using the compression expansion type absorbing member and compared it with the evaluation data of the preceding research. As the result, the members using the proposed mechanism have higher energy than the conventional one. The proposed mechanism is to install the compression expansion type absorbing member so that the load direction can be reversed to both end faces of the absorbing member and the energy can be absorbed in the tensile direction. Both end connection are made from bar with higher rigidity than the absorbing member, so it can be pulled, and the load transmitted to the frame can be absorbed. In addition, it was shown that attaching the absorbing member on the rear diagonal line of the cab frame (Chapter 4, H pillar take out) is effective.

Chapter 8 summarizes the results obtained and presented various parameters and conditions for optimum design of the cab frame using the new energy absorption mechanism for the ROPS structure.

# 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

(博士後期課程博士用)

山口大学大学院理工学研究科

報告番号	理工博甲 第 756 号	氏名	Zefry Darmawan
最終試験担当者		主査	上西 研
		審査委員	合田 公一
		審査委員	陳 献
		審査委員	大木 順司
		審査委員	春山 繁之
【論文題目】			
New Mechanism of Absorption Collision Energy on Rolling-Over Protective Structure (ROPS) Using Compression - Expansion Crash box			
(圧縮膨張型衝撃吸収部材を用いたロールオーバー保護構造の衝撃エネルギー吸収メカニズムに関する研究)			
【論文審査の結果及び最終試験の結果】			
<p>本論文ではまず、重機におけるキャブ構造の安全性評価基準として用いられているロールオーバー保護 (ROPS) 構造に対応したキャブフレームに関する歴史的背景から現在適用されているキャブフレームの設計形状について、キャブフレームの転倒時の変形荷重と変位、エネルギー吸収量に与えるキャブフレームの変形モードの影響を調査し、変形荷重およびエネルギー吸収量の低下の要因としてフレーム部材の座屈変形 (グローバル、ローカル) が大きく影響していることを示した上で、座屈変形による変形荷重の低下を生じさせないためのキャブフレームの設計が必要である問題点を示した。また、現行の ROPS 規格に対応したキャブフレームでは、高い変形荷重を得るために異形断面を用いたフレーム部材やフレーム梁部材に高剛性な鋳物部材を用いるなど、適用重機毎にキャブフレームの最適設計が必要である問題点を指摘した。</p> <p>そこで本研究では、FEM 解析から ROPS 規格に対応した 6 ポストのキャブフレームについて各部材のエネルギー吸収特性に与える設計パラメーターの影響について評価し、ROPS 構造における各部位における最適な設計パラメーターの組合せからキャブフレームにおける重要フレーム部材に着目し、重要部材に座屈変型を生じさせないためのフレーム部材の肉厚制御がエネルギー吸収特性の向上に効果があることを示した。</p> <p>次に、フレーム部材の肉厚の増加だけではキャブフレーム全体の重量増加につながると同時に十分なキャブフレームの変形特性を得ることが困難であるという課題から、キャブフレームとして多くて適用されている角柱部材の曲げ崩壊におけるエネルギー吸収特性から曲げ特性に与える要因として、角柱の形状比 (<math>t/C</math>) によって Side collapse (<math>t/C = 0.01, 0.02</math>), Bottom collapse (<math>t/C = 0.03, 0.04</math>), Flat collapse (<math>t/C = 0.05</math>) の 3 種類の変形モードがあることを示した上で、それぞれの変形モードを示す角柱端面に曲げ崩壊時の座屈変形を制御するため、座屈変形を生じない安定した変形特性を有する圧縮膨張型衝撃吸収部材に着目し、圧縮膨張型衝撃吸収部材を適用した。さらに新たな引張型エネルギー吸収部材によりローカル座屈が発生する曲げ変位を大きくすると同時にエネルギー吸収量を高めることができることを数値解析により示した。しかし、ROPS 規格に対して十分なキャブフレームの変形量を得ることが困難であるため、重要部位であるキャブフレーム背面部の対角線上に引張型衝撃吸収部材を適用した新しいエネルギー吸収メカニズムを提案し、実機の解析データとの比較検証からより高いエネルギー吸収特性が得られることを明らかにした。</p> <p>以上のように、本研究で提案した引張型エネルギー吸収部材を用いた新しいエネルギー吸収メカニズムは、これまでの ROPS 規格対応キャブフレームの設計法への新たな可能性を示したものであり、今後のロールオーバー保護 (ROPS) 構造に対応したキャブフレームの開発に大きく貢献することが期待できる。</p>			

本審査会では、予備審査会において指摘された圧縮膨張型衝撃吸収部材および新たに提案した部材に関するエネルギー吸収メカニズム、理論解析モデルにおける境界条件、解析条件についての質問事項に対し明確な回答があった。

公聴会における主な質問内容は、引張型衝撃吸収部材の製作費用に関するもの、引張型衝撃吸収部材の取付け方向・取付け位置によるエネルギー吸収特性への影響、材料特性に関するもの、キャブフレームモデルにおけるバー単体モデルと引張型衝撃吸収部材モデルの変形荷重への影響に関するものなどであった。いずれの質問に対しても発表者からの確かな回答がなされた。

以上により本研究は新規性、有用性、信頼性、実用性ともに優れ、博士（工学）の論文に十分値するものと判断した。

論文内容および審査会、公聴会での質問に対する応答などを総合的に判断して、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記の通りである。（関連論文 計4編）

(a) 査読のある雑誌等

- 1) Shigeyuki Haruyama, Oke Oktaviany, Zefry Darmawan, Tadayuki Kyoutani, Ken Kaminishi, Study on Energy Absorption Characteristic of Cab Frame with FEM, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, Vol. 10, No.3, pp. 570-576, 2016.
- 2) Shigeyuki Haruyama, Zefry Darmawan, Ken Kaminishi, Study on Bending Characteristic of Square Tube Using Energy Absorption Part, International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering, Vol.11, No. 4, pp.890-896, 2017.
- 3) Zefry Darmawan, Shigeyuki Haruyama, Ken Kaminishi, Implementation of ALD in Product Development: Study of ROPS to Improve Energy Absorption Performance Using Absorption Part, International Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 11, No.10, pp.1752-1756, 2017.

(b) 査読のある国際会議の会議録等

- 1) Zefry Darmawan, Shigeyuki Haruyama, Ken Kaminishi, Optimized Design of Cab Frame to Improve Energy Absorption Performance, AIP Conference Proceedings 3rd International Conference on Mechanical Engineering (ICOME 2017), Vol.1983, Issue 1-030002 (2018). pp. 1-10, 2018.