卒業論文

鉄道車両モジュール締結レールのリスク評価 1 p ~ 39 p 完

平成15年2月7日提出 指導教官 酒井信介教授 10205 深川健一朗

目次

第	1	章	序論	i••	•••	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	• 5	
	1	. 1	研	究の育	皆景	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• 5	
	1	. 2	本	研究の	の目	的	•••	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• 5	
	1	. 3	; 本	論文(の構	成	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	• 5	
第	2	章	基礎	理論	•••	• •	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	• (3
2		1	リスク		•••	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 7	1
2		2	応力-引	鱼度模	堼	•••	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•		• •	•	•	•	8
2		3	確率論	的有	限要	素	法	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	. ę)
2		4	ズーミ	ミング	解析	f۰	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• ę)
第	2	章角	解析手	法・	••	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	• 1	0
3		1	評価対	掾・	•••	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 1	1
3		2	本研究	の解	析目	的	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 1	1
3		3	リスク	≀計算	•••	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 1	2
3		3.	1 破	と 損確	率・	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	• 1	2
3		3.	2 景	/響度	••	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	• 1	4
3		4	評価対	象モ	デル		•	•••	•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•	•	• 1	5
3		4.	1 全	全体モ	デル	,.	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	• 1	5
3		4.	2 詯	「細モ	デル		•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	• 2	20
第	4	章	解析	結果	• •	••	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	• •	•	•	•	•	•	•	•	• 2	24
	4	. 1	全	体モラ	デル	解机	斤・	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	••	•	•	•	•	•	•	•	•	• 2	5
	4	. 2	ヹ	-==	ング	解机	斤・	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	••	•	•	•	•	•	•	•	•	• 2'	7
第	5	章	考察	••	•••	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	• •	, 33
-	5	. 1	締約	吉部に	おに	ける	締	結れ	ドル	√ h		ぎ	装	レ	_	ル	ש ו	IJ;	スク	7.	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	• 33
	5	. 2	ぎ装	もレー	JVσ.	עכ	スク	י ל	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	• 33
第	6	章	結論	ì••		•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•••	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	• •	· 36

図目次

- Fig.2.1リスクマトリックスFig.2.2応力・強度と破損確率Fig.3.1側天井荷棚モジュール・ぎ装レールFig.3.2ぎ装レール部相当応力コンター図Fig.3.3Fig.3.2 拡大図Fig.3.4実際に破壊が生じる可能性がある部分Fig.3.5全体モデルFig.3.6全体モデル寸法Fig.3.7回転自由度拘束を与えるラインFig.3.8締結部の自由度拘束
- Fig.3.9 荷棚先端の荷重
- Fig.3.10 締結部初期締結力
- Fig.3.11 詳細モデル全体
- Fig.3.12 ぎ装レール
- Fig.3.13 パネル受け
- Fig.3.14 ボルト・ナット
- Fig.3.15 自由度拘束条件・境界条件
- Fig.3.16 パネル受け・レール・締結ボルト間の各接触要素
- Fig.3.17 パネル受け穴部・締結ボルト間の各接触要素
- Fig.4.1 上側レール幅方向変位コンター図
- Fig.4.2 上側ボルト軸方向変位コンター図
- Fig.4.3 下側ボルト軸方向変位コンター図
- Fig.4.4 下側レール幅方向変位コンター図
- Fig.5.1 境界条件を与えるエリア

表目次

- Table 3.1 入力値の確率分布
- Table 3.2 全体モデル緒言(確率変数の場合平均値)
- Table 3.3 詳細モデル緒言(確率変数の場合平均値)
- Table 4.1 全体モデルでの締結ボルト応力計算結果
- Table 4.2 全体モデルでの締結ボルトの破損確率計算結果
- Table 4.3 ズーミング解析でのぎ装レール応力計算結果
- Table 4.4 ズーミング解析でのぎ装レール破損確率計算結果
- Table 4.5 締結部 (締結ボルト・ぎ装レール)のリスク評価
- Table.5.1 実際の 1/3 の降伏応力・疲労強さ
- Table.5.2 実際の 1/3 の降伏応力・疲労強さでのぎ装レールのリスク計算結果
- Table.5.3 与える境界条件
- Table.5.4 各境界条件での応力
- Table.5.5 上下締結部の各方向境界条件

第1章 序論

1.1 研究の背景

これまで、鉄道車両の設計にあたり、主に剛性、質量、強度などの因子を主たる要素として、改善が 積み重ねられてきた。このため、機能的に見たときには大幅な改善が行われたものと考えられるが、今 後、さらなる改善を進めるためには、個別部品の構造変化や配置、材料変更などが派生して必要となる ものと考えられる。その際、最終的な決断をするにあたっての意思決定のための合理的手段が必要であ る。ところが、このような観点からの研究は必ずしも十分に行われているとは言えない。

一方で、近年主に機械構造物の保守・検査においてリスク評価が意思決定手段のための手法として活用されることが期待されており、ASME(米国機械学会)や API(米国石油学会)においては検査規格の策定が進行中である。この場合、検査間隔や検査範囲の合理的決定、新規部品の交換に伴う妥当性の検証などにリスク評価が活用されている。いずれも、機械製品が運用段階に入ってからの、合理化のためのリスク評価の活用であるといえる。従来の応力-強度模型のみによる評価の場合には、評価対象が破損確率であったのに対して、リスク評価の場合にはこれに加えて破損時の影響をも合わせて検討することに特徴がある。これにより、発生確率が高く、かつ影響の大きな因子を抽出することが可能となる。

本報においては、リスク評価の意思決定手段の機能を重視し、鉄道車両の合理化への導入を検討する。 ただし、通常のリスク評価が運用段階で適用されるのに対して、ここでは設計段階での活用の可能性を 検討する。対象とする構造は側天井・荷棚モジュールであり、締結部の設計の合理化を主題とする。 リスク評価の場合、各締結部ごとに、その破損が全体にどの程度の影響を与えるかの評価が可能である ため、締結部に一対一に対応したリスクのランク付けが可能となる。しかも、破損確率の評価を用いる ために、強度と荷重のばらつきを指標の中に反映できる。従って、安全性を最適化するための、構造形 状や締結部配置の意思決定に活用できることが期待できる。

1.2 本研究の目的

本研究では鉄道車両の側天井・荷棚モジュールの締結部を対象としてリスク評価を行う。昨年度横山 らによって側天井・荷棚モジュールの締結部に対するリスク評価は行われているが、そこでは締結部の 中でもボルトの破損のみを対象としていた。しかし、実際にはボルトだけではなく、ボルトを取り付け る艤装レールについても破損する可能性が考えられる。そこで、本研究ではボルトのみならず、艤装レ ールを含めた締結部全体について、有限要素解析の結果に基づいたリスク評価を行う。モジュール全体 をシェル要素で、ボルトをビーム要素で簡潔にモデル化した全体モデルと、ボルトと艤装レールを含む 締結部をソリッド要素を用いて忠実に再現した詳細モデルの2種類のモデルを使用して、ボルトと艤装 レールのリスク評価を個別に行い、締結部の総合的なリスク評価とする。

1.3 本論文の構成

第1章では本研究の背景、目的について示した。 第2章では本研究において用いた基礎理論について示す。 第3章では本研究の評価対象、及び、それに対して行うリスク評価の手法について示す。 第4章は第3章の手法を実行して得られたリスク評価結果を示す。 第5章は第4章の結果からズーミング解析の結果と昨年度の方法による結果とを比較する。 第6章では本研究の結論を述べる。

5

第2章 基礎理論

本章では、本研究の対象および本研究において用いる理論に関して、以下の事柄について説明する。

- ・リスク
- 応力-強度模型
- · 確率論的有限要素法
- ズーミング解析

2.1 リスク

リスク R は特定の危険事象の起こりやすさ P とその影響度 C の積として定義される。

 $R = P \times C$

危険事象の起こりやすさは純粋に工学/技術の問題であるが、影響度は社会/経済にも関連する問題と なる。危険事象の起こりやすさは頻度あるいは確率によって定量化される。頻度は,一定期間にある事 象が出現する回数で、1年あたりの出現回数として/年という単位をつけて表わされることが多い。確 率は、N回の試行に対するある事象の出現回数をn回としたとき n/Nとして表わされ、0と1の間の無 次元数(単位を持たない数)となる。一方、事象が発生したときの影響度に関しては、評価の目的に応 じて、例えば石油プラントの場合では放射熱や爆風圧などの物理的作用が被害を及ぼす範囲の大きさ、 死者数や負傷者数などの人的被害、あるいは損害額などの経済的損失が用いられる。

リスク評価を行った結果は、しばしば Fig.2.1 に示すリスクマトリクスで提示される。リスクマトリ クスは横軸に危険事象の起こりやすさ、縦軸に影響度をとり、それぞれを数段階に設定したものである。 このリスクマトリクス上にリスク評価結果をプロットし、リスクが許容限度内であるかを判断する。

上述のように定義したリスクを用いて、確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Analysis; PRA)が 様々な分野で導入されている。原子力関連、化学プラント、航空宇宙産業等では PRA は規格の一部に 採用されており、他の分野においても、PRA は安全性の証明や改善の必要性を示し、意思決定手段の一 つとして用いられている。



Fig.2.1 リスクマトリックス

2.2 応力-強度模型

破損確率は確率論的有限要素法によって求めた応力の確率分布と強度の確率分布から求める。このと き両者共に正規分布だと仮定する。

応力の確率密度関数を $f_s(x)$ 、強度の確率密度関数を $f_R(x)$ とする。Fig.2.2 に示すように、 $f_s(x)$ の平均値 μ s が $f_R(x)$ の平均値 μ_R より小さくてもそれぞれの裾野部分が重なり合っていれば、応力が強度を超えて破 損が生じる。このときの破損確率は

$$P = \int_0^\infty F_R(x) f_S(x) dx$$
 (3.12)

$$F_R(x) = \int_0^x f_R(\xi) d\xi$$
 (3.13)

と表される。このとき $f_R(x)$ 、 $f_S(x)$ 共に正規分布であるため

$$P_{f} = 1 - \Phi \left(\frac{\mu_{R} - \mu_{S}}{\sqrt{\sigma_{R}^{2} + \sigma_{S}^{2}}} \right)$$
 (3.14)

$$\Phi(u) = \int_{-\infty}^{u} \phi(x) dx$$
 (3.15)

と簡略化できる。



Fig.2.2 応力・強度と破損確率

2.3 確率論的有限要素法

材料値や寸法等は本来ばらつきを持った値であると考えられる。従って、有限要素解析においてもそ れらのばらつきを考慮に入れることによって、より現実に近い解析結果が得られると考えられる。確率 論的有限要素法では、材料値、寸法等の入力パラメータを確率分布として与え、モンテカルロ法により 繰り返し有限要素解析を行い、応力等の出力パラメータを確率分布として求めることができる。そして、 入出力パラメータ間の相関から現実的な最適設計を導くことができる。ある入力パラメータのばらつき が設計上重要な出力パラメータに対して感度が高いと評価された場合、その入力パラメータのばらつき が設計上重要な出力パラメータに対して感度が高いと評価された場合、その入力パラメータは設計上重 要であることが分かる。また、入力パラメータのばらつきの影響による出力パラメータのばらつきがど の程度であり、設計基準を満たさない確率がどの程度であるのかといった、設計における実現性と信頼 性の評価を行うことができる。従って、確率論的有限要素解析結果より製品の信頼性と品質に大きな影 響を及ぼす入力パラメータを見つけ出し、効果的にコストを配分することができる。逆に、製品の信頼 性が十分であるという結果が得られた場合、製品の信頼性にとって重要でない入力パラメータに対して は、許容範囲内でより低コストの製造プロセスを適用することができると考えられる。

2.4 ズーミング解析

ズーミング解析とは、粗い要素成分で解析した後に一部分を詳細な要素成分に置き換えてその部分を 再解析する手法である。モデル全体が比較的大きく要素が大きくなると応力集中部では精度の高い解析 が行えない。そこで粗い要素成分の全体モデル解析と詳細な要素成分に改めた応力集中部の解析と二段 階に解析を行うことで、短時間で高精度の解析を行うことができる。

ズーミング解析の手順は

まず全体の粗い要素モデルで解析を行い、

応力集中部を含む適切な領域に詳細な要素のモデルを作成し、

そのモデルの境界上に で得た変位あるいは節点荷重を与え解析を行う となる。

第3章 解析手法

本章では以下の事柄について説明する

- ・ 解析対象
- ・ 解析の目的
- ・ 確率論的有限要素解析結果を用いたリスク解析手法
- ・ ボルト発生応力を評価するために用いる有限要素シェルモデル
- ・ 艤装レール発生応力を評価するために用いる、締結部全体の有限要素ソリッドモデル

3.1 評価対象

従来、鉄道車両の内装は部品単位で構体に取り付けられていたが、リサイクル、リユースの観点から 部品点数削減、容易な着脱、リサイクル容易な材料の使用が求められるようになった。この要求に応え るものの一つとして、内装の構造・機能・デザインの自立化を目的としたアルミ合金製の内装モジュー ルが開発された。内装モジュールは天井パネル、側天井・荷棚モジュール、側面パネルなどからなり、 各々を外部で組み立てた後構体に取り付けられる。構体には、長手方向に一様な断面を持つ内装モジュ ール取り付け用レールが形成されており、ボルト等で内装モジュールが取り付けられる。本研究では内 装モジュールの一要素である側天井・荷棚モジュールを対象とし、その締結部のリスクを評価する。



Fig.3.1 側天井・荷棚モジュールと艤装レール

3.2 本研究の解析目的

昨年度行われた側天井・荷棚モジュールの締結部に対するリスク評価では、締結部を構成する艤装レ ール、ボルト・ナット、被締結物の中で、ボルトの破損のみを対象としていた。しかし、実際にはボル トだけではなく、ボルトを取り付ける艤装レールについても破損する可能性が考えられる。そこで、本 研究ではボルトのみならず、艤装レールを含めた締結部全体について、有限要素解析の結果に基づいた リスク評価を行う。モジュール全体をシェル要素で、ボルトをビーム要素で簡潔にモデル化した全体モ デルと、ボルトと艤装レールを含む締結部をソリッド要素を用いて忠実に再現した詳細モデルの2種類 のモデルを使用して、ボルトと艤装レールのリスク評価を個別に行い、締結部の総合的なリスク評価と する。

3.3リスク計算

通常、荷棚モジュールのような部品の締結部に関する取り扱いは、締結部単体の機能改善が検討され るとともに、締結部の配置は作業工程の容易さや見栄えなどが主たる要因で決定されている。しかし、 設計段階において、締結部配置やパネル長について意思決定が求められるとき、構造体の中における各 締結部が担う役割を的確に評価することが求められる。その場合、強度のばらつきや、締結力のばらつ きなどの不確定性因子についても配慮する必要がある。これまでは、このような観点からの検討は必ず しも十分に行われているとは言えない。そこで、ここでは新たにリスク概念を導入することとし、各締 結部のリスク値の評価により意思決定と結びつけることを提案する。このためには、まず妥当性のある リスクを定義しておく必要がある。

工学リスクは一般的に、機械やシステムの故障確率とその故障による被害の大きさの積として定義される。本研究においては、モジュールにおける1箇所の締結部の破損がモジュール全体の故障に至る可能性を評価する。そこで、モジュールにおけるある締結部の破損が他の締結部に及ぼす影響を考えるために、締結部 *i* の破損確率を *P_i、締*結部 *i* の破損が締結部 *j* (*i*) に及ぼす影響度を *C_{ij}* として、締結部 *i* が締結部 *j* に対して負うリスク *R_i、*そして締結部 *i* のリスク *R_i*を以下のように定義する。

$$R_{ij} = P_i \times C_{ij}$$

(3.1)

$$R_i = \max R_{ij}$$

(3.2)

以下で、上式における破損確率 P_i 及び影響度 C_{ij} を求める手順を示す。

3.3.1 破損確率

締結部 i の破損確率 P_iを求めるにあたり、側天井・荷棚モジュールにおける荷重条件や周囲の環境を考 慮した上で、主たる要因として以下の4つの破損モードを考える。

- 1)過大荷重によるボルトの静的破壊(破損確率 P_{bl})
- 2)繰り返し荷重によるボルトの疲労破壊(破損確率 P_{fl})
- 3) 過大荷重による艤装レールの静的破壊(破損確率 P_{b2})

4)繰り返し荷重による艤装レールの疲労破壊(破損確率 Pf2)

4 つの破損モードは独立で、同時に発生することはないものと仮定すると、締結部破壊確率 Pi は

$P_i = \frac{P_{b1} + P_{f1} + P_{b2} + P_{f2}}{2}$	(3.3)
---	-------

と表される。

上述した破損モードに関係する材料値や締結力はばらつきを持っているため、確率分布として考える 必要がある。本研究では、材料値、締結力等の入力値を確率分布として与え、ラテン方格サンプリング を用いたモンテカルロ法により確率論的有限要素解析を行い、故障モードの生起確率に関係する出力値 (応力等)を求める。そして,出力値(応力等)の確率密度関数 f_S(x)と強度の確率密度関数 f_R(x)とから 応力-強度模型の式を用いて、出力値(応力)>強度となる確率すなわち故障確率を求める。材料値や構 造形状等、入力値について設定した確率分布を Table 3.1 に示す。確率分布は測定データが得られていな いため全て正規分布とし、変動係数 C.O.V.は安全を見て大きめの値を設定した。ただし、初期締結力分 布は実験値に基づいて設定した。

	平均值 µ	標準偏差	範囲
各縦弾性係数	Table.3.2Table.3.3 参照	0.05μ	
各板厚	Table.3.2Table.3.3 参照	0.05μ	[0.99µ、1.01µ]
各密度	Table.3.2Table.3.3 参照	0.05μ	
座面間静摩擦係数	0.15	0.05μ	
初期締結力	3.3 k N	0.027μ	
ボルト降伏応力	358MPa	0.05μ	
ボルト疲労強さ	1 2 4 MP a	0.05μ	
艤装レール降伏応力	2 4 5 MP a	0.05μ	
艤装レール疲労強さ	1 2 0 MP a	0.05μ	

Table 3.1 入力値の確率分布

以下で、各破損モード生起確率の計算方法を説明する。

1)過大荷重によるボルトの静的破壊(破損確率 *P_{b1}*)

側天井・荷棚モジュール全体のモデルを用いて繰り返し有限要素解析を行った結果得られる、ボルトに 発生する最大相当応力の確率分布と、ボルト強度分布の相対的位置関係から破損確率を求める。

2)繰り返し荷重によるボルトの疲労破壊(破損確率 P_{fl})

側天井・荷棚モジュール全体のモデルを用いて繰り返し有限要素解析を行った結果得られる、ボルトに 発生するの最大第一主応力の変動成分と、ボルト疲労強度分布の相対的位置関係から破損確率を求める。

3)過大荷重による艤装レールの静的破壊(破損確率 P_{b2})

締結部のみを詳細にモデル化したモデルを用いて繰り返し有限要素解析を行った結果得られる、艤装レ ールの実際に破壊が生じると思われる部分(FIg.)に発生する最大相当応力の確率分布と、艤装レール 強度分布の相対的位置関係から破損確率を求める。

4)繰り返し荷重による艤装レールの疲労破壊(破損確率 P_{f2})

締結部のみを詳細にモデル化したモデルを用いて繰り返し有限要素解析を行った結果得られる、艤装レ ールの実際に破壊が生じると思われる部分(FIg.)に発生するの最大第一主応力の変動成分と、艤装レ ール疲労強度分布の相対的位置関係から破損確率を求める。

Fig.3.3 で示すように相当応力・第一主応力は、ぎ装レール内部のR部付近で大きくなることがわかる。 この結果から応力は Fig.3.4 で示す部分から得ることとする。



Fig.3.2 ぎ装レール部相当応力コンター図

Fig.3.3 Fig3.2 拡大図



Fig.3.4 実際に破壊が生じる可能性がある部分(レール左側も含む)

3.2.2 影響度

影響度 C_{ii}は、締結部 i が故障する前後での他の締結部 j の故障確率の差で定義する。つまり、

 $C_{ij} = P_{ij} - P_j$

(3.11)故障前後の比ではなく差とすることで、P_{ii}及び P_iの値の絶対量を考慮することができる。締結部 i 故障 後の締結部 jの故障確率 Pii を求めるためには締結部 i のビーム要素を省略したモデルを用いて3.3.

1で説明した方法を実行した。

3.4 評価対象モデル

側天井・荷棚モジュールの締結部のボルトとぎ装レールの応力分布を求めるために、本研究では有限 要素解析を2段階に分けて実行する。第1段階としては、側天井・荷棚モジュール全体をシェル要素で、 ボルトをビーム要素で簡潔にモデル化したモデル(全体モデルと呼ぶ)を用いて解析を行い、ボルトに 発生する応力を求めて破損確率評価を行う。第2段階としては、締結部周辺のみをソリッド要素を用い て詳細にモデル化したモデル(詳細モデルと呼ぶ)を用いて解析を行い、ぎ装レールに発生する応力を 求めて破損確率評価を行う。このとき、詳細モデルの境界条件は、全体モデルの解析結果からズーミン グ解析手法を用いて導入する。以下で、全体モデル、および詳細モデルについて詳しく説明する。

3.4.1 全体モデル

全体モデルの形状と寸法をそれぞれ Fig.3.5、Fig.3.6 示す。また、全体モデルの緒元を Table 3.2 に 示す。全体モデルは、シェル要素とビーム要素により構成されている。



Fig.3.5 全体モデル



Fig.3.6 全体モデル寸法

全体モデルの自由度拘束条件について以下で説明する。

- ・ レールに取り付けられるパネル受けに相当する部分の長手方向ラインに長手方向軸周りの回転自由 度を拘束する(Fig.3.7)。
- ・ ボルトに相当するビーム要素のうち、レール側の一端の全自由度を、パネル側の全回転自由度を拘 束する (Fig.3.8)。







Fig.3.8 締結部の自由度拘束

次に荷重条件について説明する。

- 荷棚部分の先端に 1.96N/m の等分布荷重に相当する集中荷重を先端上の 5 点(Fig.3.9)に作用させる。
- 締結部に初期締結力に相当する引張荷重を作用させる。このとき締結ボルトのリスク評価のための 解析と、ズーミング解析用データサンプリングのための解析とで初期締結力の向きを変える必要が ある。前者ではボルト引っ張り方向の、後者では圧縮方向の初期締結力を与える。(Fig.3.10)
- ・ 重力加速度を作用させる。



Fig.3.9 荷棚先端の荷重



Fig.3.10 締結部初期締結力

Table 3.2 全体モデル緒元(確率変数の場合平均値)

	側天井パネル	パネル受け			
材料	アルミロールコアサンドイッチパネル	アルミニウム			
要素	4 接点弾性シェル	4 接点弾性シェル			
各部寸法	厚さ:40mm	厚さ:3mm			
材料値	E x : 4 9 3 4 M P a	E=7 1 GP a			
	Еу:5603МРа	= 0 . 3			
	Gxy:1871MPa	= 2 6 8 0 k g / m ³			
	Gyz:54.1MPa				
	Gzx:36.3MPa				
	xy: 0.3				
	yz = zx = 0				
	= 1 4 5 k g / m ³				
要素数	1 4 4 0	4 6 5 4			

荷棚パネル	ボルト		
アルミニウム	鋼		
4 接点弾性シェル	3次元ビーム		
厚さ:10mm	断面:一辺6mm円		
	断面積:28.3mm²		
	断面二次モーメント:63.6mm⁴		
E : 7 1 G P a	E= 2 1 0 GP a		
:0.3	= 0 . 3		
= 2 6 8 0 k g / m ³	= 7 8 6 0 k g / m ³		
960	1 2		
	荷棚パネル アルミニウム 4 接点弾性シェル 厚さ:10mm E:71GPa :0.3 = 2680kg/m ³ 960		

	パネルとパネル受の接続			
材料				
要素	3次元ビーム			
各部寸法	断面:一辺 5 mm正方形			
	断面積:2 5 mm ²			
	断面二次モーメント:			
	52.1mm4			
材料值	E : 1 0 ⁶ G P a			
要素数	396			

3.4.2 詳細モデル

詳細モデル全体を Fig.3.10 に示す。詳細モデルの中で、締結部を構成するぎ装レール、パネル受け、 ボルト・ナットをそれぞれ、Fig.3.11、Fig.3.12、Fig.3.13 に示す。また、詳細モデルの緒言を Table 3.3 に示す。詳細モデルはソリッド要素によりモデル化されている。



Fig.3.11 詳細モデル全体







Fig.3.14 ボルト・ナット

詳細モデルの自由度拘束条件を以下で説明する(Fig.3.15)。

- ・ 艤装レール部端の全自由度を拘束する
- ・ パネル受けの周囲に全体モデルから得た変位を与える



Fig.3.15 自由度拘束条件・境界条件

次に荷重条件を以下に示す。

- ・ ボルト軸部に初期締結力を与える。
- ・ 重力加速度を与える。

最後に要素に与える接触要素を説明する。要素同士が接触すると反発力・摩擦力が働く。これらを再 現するために、Fig.3.16・Fig.3.17 に示すように、接触要素をパネル受け・ぎ装レール・締結ボルト間 およびパネル受穴部・締結ボルト軸部間に与え解析を行った。



Fig.3.16 パネル受け・レール・締結ボルト間の各接触要素



Fig.3.17 パネル受け穴部・締結ボルト間の各接触要素

Table3.3 詳細モデル緒元(確率変数の場合平均値)

	パネル受け	ボルト・ナット			
材料	アルミニウム	鋼			
要素	10接点3次元ソリッド	3次元ビーム			
材料値	E : 7 1 G P a	E= 2 1 0 GP a			
	: 0 . 3	= 0 . 3			
	= 2 6 8 0 k g / m ³	= 7 8 6 0 k g / m ³			
要素数	1 1 2 5	2 3 6 8			

	ぎ装レール				
材料	アルミニウム				
要素	10接点3次元ソリッド				
材料値	E : 7 1 G P a				
	: 0 . 3				
	= 2 6 8 0 k g / m ³				
	6332				

第4章 解析結果

本章では前章までで説明した評価対象モデルの応力解析結果(Table.4.1 Table.4.3)リスク評価結果 (Table.4.2 Table4.4 Table4.5)を示す。

また側天井荷棚モジュール上側締結部、下側締結部それぞれのサブモデル解析での変形、相当応力分布 を Fig.4.1・Fig.4.2・Fig4.3・Fig4.4 で示す。

4.1 全体モデル解析

 Table 4 . 1 全体モデルでの締結ボルト応力計算結果(~~ は締結部番号)

 正常状態での締結ボルト応力値(MPa)

引張応力	平均	165	171	165	239	285	239
	分散	8.26	8.00	8.56	8.07	7.99	7.92

締結ボルトiが破損した状態での締結ボルトjの応力値(MPa)

		j						
i								
	引張応力	平均		168	165	239	285	239
		分散		8.37	8.92	7.97	8.39	8.44
	引張応力	平均	168		168	239	286	239
		分散	8.37		8.12	8.30	7.78	8.78
	引張応力	平均	164	174		239	285	239
		分散	8.98	8.29		8.40	8.31	7.70
	引張応力	平均	183	169	177		442	172
		分散	8.39	8.38	8.46		10.2	8.16
	引張応力	平均	169	181	169	305		304
		分散	8.40	8.16	8.16	8.46		8.28
	引張応力	平均	177	169	183	172	442	
		分散	7.69	8.51	8.59	8.05	11.0	

 Table 4 . 2 全体モデルでの締結ボルトの破損確率計算結果(~~ は締結部番号)

 正常状態での締結ボルト破損確率 P₁

0	0	0	3.43E-10	5.23E-5	3.03E-10

締結部iが破損した状態での締結ボルトjの破損確率 P_{ij}

j i						
		0	0	3.04E-10	5.94E-5	4.83E-10
			0	3.84E-10	5.90E-5	5.50E-10
	0	0		4.83E-10	5.94E-5	3.04E-10
	0	0	0		5.00E-1	0
	0	0	0	1.79E-3		1.66E-3
	0	0	0	0	5.00E-1	

締結部 iの締結ボルト j に対する影響度 C_{ij} = P_i - P_{ij}

j i						
		0	0	3.04E-10	5.94E-5	4.83E-10
	0		0	3.84E-10	5.90E-5	5.50E-10
	0	0		1.23E-10	4.00E-6	-7.90E-11
	0	0	0		5.00E-1	-3.43 E -10
	0	0	0	1.79E-3		1.66E-3
	0	0	0	-3.43E-10	5.00E-1	

締結ボルトiの締結ボルトjに対するリスク $R_{i\,j}$ = P_{i} × $C_{i\,j}$

j i						
		0	0	0	0	0
	0		0	0	0	0
	0	0		0	0	0
	0	0	0		1.71 E -10	-1.18 E -19
	0	0	0	9.31E-8		8.68 E -8
	0	0	0	-1.18E-19	1.71E-10	

締結ボルトiのリスク \mathbf{R}_{i} =max \mathbf{R}_{ij}

0	0	0	1.71E-10	9.31E-8	1.71E-10		

4.2 ズーミング解析

Table 4 . 3 ズーミング解析でのぎ装レール応力計算結果 (~ は締結部番号)

相当応力	平均	67.3	118	67.3	92.0	88.2	92.0
	分散	4.24	4.71	4.24	4.31	3.83	4.31
第一主応力	平均	57.6	85.0	57.6	106	102	106
	分散	5.97	6.94	5.97	3.04	3.19	3.04

正常状態での締結部付近ぎ装レール応力値(MPa)

締結部iが破損した状態での締結部j付近ぎ装レールの応力値(MPa)

		j						
i								
	相当応力	平均		111	84.7	97.6	90.0	93.4
		分散		1.20	1.11	3.43	6.99	2.59
	第一主応力	平均		128	55.6	112	104	108
		分散		2.49	2.00	2.46	2.88	2.70
	相当応力	平均	77.4		77.4	99.0	88.3	99.0
		分散	1.81		1.81	2.79	3.27	2.79
	第一主応力	平均	69.0		69.0	111	102	111
		分散	1.96		1.96	2.04	2.93	2.04
	相当応力	平均	84.7	111		93.4	90.0	97.6
		分散	1.11	1.20		2.59	6.99	3.43
	第一主応力	平均	55.6	128		108	104	112
		分散	2.00	2.49		2.70	2.88	2.46
	相当応力	平均	63.6	118	117		81.3	97.3
		分散	2.00	4.36	3.84		5.19	4.43
	第一主応力	平均	54.0	83.5	80.9		91.5	113
		分散	2.90	6.98	5.43		5.29	2.84
	相当応力	平均	66.8	119	66.8	94.0		94.0
		分散	1.40	1.10	1.40	4.38		4.38
	第一主応力	平均	56.9	87.7	56.9	107		107
		分散	2.09	2.29	2.09	1.68		1.68
	相当応力	平均	117	118	63.6	97.3	81.3	
		分散	3.84	4.36	2.00	4.43	5.19	
	第一主応力	平均	80.9	83.5	54.0	113	91.5	
		分散	5.43	6.98	2.90	2.84	5.29	

Table 4 . 4 ズーミング解析でのぎ装レール破損確率計算結果

正常状態でのぎ装レール破損確率 P_i

0	0	0	0	0	0

締結部iが破損した状態での締結部jの破損確率 P_{ij}

j i						
		0	0	0	0	0
	0		0	0	0	0
	0	0		0	0	0
	0	0	0		0	0
	0	0	0	0		0
	0	0	0	0	0	

締結部 i の締結部 j に対する影響度 C_{ij} = P_i - P_{ij}

j i						
		0	0	0	0	0
	0		0	0	0	0
	0	0		0	0	0
	0	0	0		0	0
	0	0	0	0		0
	0	0	0	0	0	

締結部
i の締結部 j に対するリスク
 $R_{\rm i\,j}$ = $P_{\rm i}$ × $C_{\rm i\,j}$

j i						
		0	0	0	0	0
	0		0	0	0	0
	0	0		0	0	0
	0	0	0		0	0
	0	0	0	0		0
	0	0	0	0	0	

締結部 $i o U \land p R_i = m a \land R_{ii}$

0	0	0	0	0	0		

Table 4.5 締結部 (締結ボルト・ぎ装レール)のリスク評価

正常状態	態での締結部砥	皮損確率 ₽ _i =	<u>F(</u> 締結ボルト)+F(ぎ装レール) 2			
0	0	0	3.43E-10	5.23E-5	3.03E-10	

締結部iが破損した状態での締結部jの破損確率 P_{ij}

j						
		0	0	3.04E-10	5.94E-5	4.83E-10
	0		0	3.84E-10	5.90E-5	5.50E-10
	0	0				
	0	0	0		5.00E-1	0
	0	0	0	1.79E-3		1.66E-3
	0	0	0	0	0	

締結部iの締結部jに対する影響度C_{ij}=P_i-P_{ij}

j i						
		0	0	-3.90E-11	7.40E-6	1.40E-10
	0		0	4.10E-11	7.00E-6	4.00E-6
	0	0		1.23E-10	4.00E-6	-7.90E-11
	0	0	0		5.00E-1	-3.43E-10
	0	0	0	1.79E-3		1.66E-3
	0	0	0	-3.43E-10	5.00E-1	

締結部 iの締結部 j に対するリスク $R_{ij} = P_i \times C_{ij}$

j i						
		0	0	0	0	0
	0		0	0	0	0
	0	0		0	0	0
	0	0	0		1.71E-10	-1.18E-19
	0	0	0	9.31E-8		8.63E-8
	0	0	0	-1.18E-19	1.71E-10	

締結部 i のリスク \mathbf{R}_i = m a x \mathbf{R}_{ij}

			T	i j	
0	0	0	1.71E-10	9.31 E -8	1.71 E -10



Fig.4.1 上側レール幅方向変位コンター図



Fig.4.2 上側レール幅方向変位コンター図







Fig4.4 下側レール幅方向変位コンター図

第5章 考察

本章では前章の結果に基づいて以下の事柄について検討する。

- ・ 締結部のリスクに占める締結ボルト・ぎ装レールのリスク
- ・ ぎ装レール間の相対的リスク評価

5.1 締結部における締結ボルト・ぎ装レールのリスク

前章の結果より締結部でのリスクは締結ボルトのリスクが支配的であることが確認できた。

5.2 ぎ装レールのリスク

前章の結果よりぎ装レールのリスクは小さく、締結部のリスク評価の時には締結ボルトのリスクが支配 的であることがわかった。しかしぎ装レールにも応力・ばらつきがある以上無視できない。

そこで降伏応力・疲労強さを実際の $\frac{1}{3}$ だと仮定してぎ装レールのリスク評価を行う(Table.5.2)。

Table . 5 . 1 🗿	実際の <mark>1</mark> の降伏応力・疲労強さ
-----------------	-------------------------------

降伏応力	疲労強さ
8 2 MPa	4 1 MPa

Table5.2 実際の $\frac{1}{3}$ の降伏応力・疲労強さでのぎ装レールのリスク計算結果(~ は締結部番号)

9.83E-06	4.38E-07	9.83E-06	3.07E-14	1.20E-1	3.07E-14

正常状態でのぎ装レール破損確率 P_i

締結部 i が破損した状態での締結部 j 付近ぎ装レールの破損確率 P_{ij}

j i						
		1.58E-2	3.13E-10	8.24E-5	1.01E-4	2.57E-6
	4.14E-13		4.14E-13	1.05E-4	1.82E-7	1.05E-4
	3.13E-10	1.58E-2		2.57E-6	1.01E-4	8.24E-5
	0	1.32E-1	1.02E-1		6.41E-8	1.89E-4
	0	1.31E-1	0	3.27E-5		3.27E-5
	1.02E-1	1.32E-1	0	1.89E-4	6.41E-8	

締結部 iの締結部 j付近ぎ装レールに対する影響度 C_{ij} = P_i - P_{ij}

j i						
		-1.04E-1	3.13E-10	7.26E-5	1.00E-4	-7.26E-6
	3.83E-13		3.83E-13	9.54E-5	-2.56E-7	9.54E-5
	3.13E-10	-1.04E-1		-7.26E-6	1.00E-4	7.26E-5
	-3.07E-14	1.17E-2	1.02E-1		-3.74E-7	1.79E-4
	-3.07E-14	1.11E-2	-3.07E-14	2.29E-5		2.29E-5
	1.02E-1	1.17E-2	-3.07E-14	1.79E-4	-3.74E-7	

締結部 iの締結部 j付近ぎ装レールに対するリスク R_{ij} = $P_i \times C_{ij}$

j i						
		3.20E-15	9.60E-24	2.23E-18	2.23E-18	-2.23E-19
	4.59E-14		4.59E-14	1.14E-5	-3.07E-8	1.14E-5
	9.60E-24	3.20E-15		-2.23E-19	2.23E-18	2.23E-18
	-3.02E-19	1.15E-7	1.01E-6		-3.68E-12	1.76 E -9
	-1.35E-20	4.85E-9	-1.35E-20	1.00E-11		1.00E-11
	1.01E-6	1.15E-7	-3.02E-19	1.76 E -9	-3.68E-12	

締結部 i 付近ぎ装レールのリスク \mathbf{R}_i = m a x \mathbf{R}_{ij}

0	1.14E-08	0	1.01E-06	4.85E-09	1.01E-06

Table5.2 に示す結果から、ぎ装レールのリスクは締結ボルト同様側天井荷棚モジュール下側の締結部の 方が大きくなることが確認できた。また上側、特に中央の締結部のリスクが大きくこの点は締結ボルト と異なっている。上側ぎ装レールと下側ぎ装レールとで異なっている点は、上側ぎ装レールの境界条件 は締結ボルト軸方向変位が大きい一方で下側ぎ装レールの境界条件はぎ装レール幅方向変位が大きい ことであり、リスクの違い、つまり応力の違いはこれに因るものと思われる。

そこで Fig.5.1 に示すエリアに、今までのズーミング解析で与えてきた変位の代わりに ~ のような 境界条件を与えて応力解析を行い、境界条件と応力の関係について検証することにする。



Fig.5.1 境界条件を与えるエリア

軸方向変位	0.5mm
幅方向変位	0.5mm
軸方向変位	片側 - 0 . 5 mm 片側 0 mm

Table.5.3 与える境界条件

その結果、締結ボルト・ぎ装レールそれぞれの相当応力・第一主応力は以下のようになった。

締結ボルト相当応力	締結ボルト第一主応力	ぎ装レール相当応力	ぎ装レール第一主応力
201	205	126	41
343	352	148	62
164	159	42.1	33.1

Table.5.4 各境界条件での応力

Table.5.4 の結果より、締結ボルトの応力はぎ装レール幅方向変位境界条件の影響が大きいことがわかる。一方ぎ装レールの応力はぎ装レール幅方向変位境界条件の影響も大きいが、締結ボルト軸方向変位 境界条件(正側変位のみ)の影響も大きいと言える。

次に上下、各締結部に与えられている境界条件を Fig.4.1~4 で確認する。

	締結ボルト軸方向変位	ぎ装レール幅方向変位
(上側)	0~1	-0.1 ~ 0.2
(下側)	-0.6 ~ 0.04	-0.03 ~ 0.5

Table.5.5 上下締結部の各方向境界条件

Table5.5 に示すように上側締結部では締結ボルト軸方向変位が大きいこと、下側締結部ではぎ装レール 幅方向変位と締結ボルト軸方向変位(ただし数値は負である)が大きいことがわかる。以上の結果から、 締結ボルト・ぎ装レールそれぞれのリスクの大きさの傾向が異なることが確認できる。

第6章 結論

- ・側天井荷棚モジュールの締結部のリスクを評価するために、締結部を構成する締結ボルト・ぎ装レー ルそれぞれについてのリスク評価を行った結果、締結部におけるリスクは締結ボルトのリスクが支配 的であることがわかった。
- ・締結部のリスク評価の結果、今回の想定条件ではぎ装レールのリスクは締結ボルトに比べ無視できる ほど小さいことがわかったが、ぎ装レールの相対的なリスクを知るためにぎ装レールの強度を下げて リスク評価を行ったところ、ぎ装レールの各締結部でのリスクは側天井荷棚モジュール下側のぎ装レ ールが大きく、また締結ボルトと違い上側中央締結部のリスクも下側ほどではないが大きいことが確 認できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、酒井信介教授、泉聡志講師、㈱日立製作所笠戸事業所の川崎健様、ならびに 酒井・泉研究室の皆様には多大なご支援をいただきありがとうございました。

酒井教授・泉講師には適切な助言、激励等をいただき研究を進める上での大きな励みになりました。 川崎様には本研究になくてはならない多くの技術資料や専門家としての助言をいただきました。 酒井・泉研究室の皆様には暖かい声援を送っていただき充実した研究生活を送らせていただきました。 以上簡単ではありますが、私からの謝辞とさせていただきます。

参考文献

- 1)横山 喬,2001年度東京大学卒業論文, "鉄道車両の内装モジュール設計に対するリスク評価の応用"
- 2)川崎健ほか"アルミニウム合金中空押出形材を用いた鉄道車両構体の構造解析" 機A 65(636)1832~1838
- 3)川崎健ほか"中空押出形材で構成した鉄道車両におけるギ装締結部の構造強度特性" 機A 65(636)1839~1844
- 4) 吉本勇 "JIS 使い方シリーズ ねじ締結体設計のポイント" 日本規格協会
- 5) 吉澤武男ら "新編 JIS 機械製図第2版" 森北出版株式会社
- 6)日本材料学会編 "機械・構造系技術者のための実用信頼性工学" 養賢堂
- 7)日立製作所内部資料
- 8) ANSYS ホームページ <u>http://www.cybernet.co.jp/ansys/</u>

卒業論文

平成 15 年 2 月 7 日 提出

10205 深川健一朗