

搭載荷物の影響を考慮したパレットラックシステムの フォークリフト衝突時挙動解析

Behavior Analysis of a Pallet Rack System

Considering the Effects of Loaded Goods During Forklift Collisions

中井恵樹¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Keiju Nakai and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: s2210279@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博 (工) 筑波大学 システム情報系 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

One of the risks associated with pallet rack systems used in logistics warehouses is forklift collisions. Understanding the behavior of rack systems during forklift collisions is important for implementing accident countermeasures. We developed a behavior analysis scheme that incorporates contact forces based on the penalty contact theory, enabling consideration of both the behavior of loaded goods and the interaction between goods and the rack system. By comparing the result with conventional method that performed the behavior analysis by including the load mass within the rack system, we confirmed the importance of considering the behavior of loaded goods. Furthermore, we analyzed the changes in the overall behavior of the rack system when the impact point was varied, confirming that this approach can simulate strength differences inherent to the rack system's structure.

Key Words : Pallet rack system, Loaded goods, Forklift, ASI-Gauss code

1. はじめに

現代の物流を支える物流倉庫に存在するリスクの一つとして、荷物を搭載・保管するためのパレットラックシステム (以下、ラックシステム) へのフォークリフトの衝突事故が挙げられる。事故発生時には、図1[1]のようにラックシステムが崩壊し、人命を危険に晒すだけでなく多大な経済的損失も被る可能性がある。

衝突事故対策を施すためには、フォークリフト衝突時にラックシステム全体がとる崩壊挙動を知る必要があるが、これを実験によって確かめるのは安全面やコスト面から現実的ではない。低コストで様々な状況での危険予測を可能とするため、数値解析によるラックシステムの崩壊挙動の再現が期待されている。

ラックシステムのフォークリフト衝突時挙動解析に関する研究には、磯部ら[2]による研究がある。この研究では、ラックシステムにフォークリフトが衝突した際に発

生する進行性崩壊現象を再現する解析が行われた。しかし、ラックシステムに搭載された荷物のモデル化は行わず、荷物の重量に相当する質量を部材密度に換算してラックシステムモデルに加える手法 (以下、既存手法) をとっていたため、荷物の移動や落下による影響を考慮できないといった問題があった。そこで本研究では、ラックシステムに搭載されている荷物もモデル化し、荷物の動きや荷物-ラックシステム間の力学的相互作用が考慮可能な連成解析手法を開発し、ラックシステムのフォークリフト衝突時挙動解析を実施した。

2. 解析手法

本研究では、数値解析手法としてASI-Gauss法[3]を用いた。また、ラックシステムの破断を表現するために部材破断アルゴリズムを導入し、ラックシステムや荷物の接触を表現するために接触・接触解除アルゴリズムを導入した。

(1) 部材破断アルゴリズム

まず、本研究で使用した部材破断アルゴリズムについて述べる。塑性ヒンジが生じた要素について、曲率、せん断ひずみおよび引張ひずみについて以下の条件を満たした場合に破断を判定する。

$$\begin{aligned} & \left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \text{ or} \\ & \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{yz}}{\gamma_{yz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_{z0}} \right) \geq 1 \end{aligned} \quad (1)$$



図1 フォークリフトの衝突事故後の様子[1]

ここで、 κ_x, κ_y はx軸、y軸回りの曲率、 γ_{xz}, γ_{yz} はx軸、y軸方向のせん断ひずみ、 ϵ_z はz軸方向の引張ひずみである。また、下添え字“0”は臨界値であることを示す。なお、式(1)は構造部材の鋼材の破断を想定した条件式であり、ラックシステムの構造部材の接続部の剛性を表現するためには磯部ら[2]の条件を使用する。その具体的な条件については3章(1)節で述べる。部材破断が判定された場合には、その要素に生じている断面力を直ちに解放する。すなわち、当該要素に生じている断面力は全成分が0となり、以後その要素は強度を有する要素として機能することはない。

(2) 接触・接触解除アルゴリズム

本研究では、ギャップ要素による接触・接触解除アルゴリズムおよびペナルティ理論に基づく接触アルゴリズムの2種類の接触アルゴリズムを使用した。

a) ギャップ要素による接触・接触解除アルゴリズム

ギャップ要素による接触・接触解除アルゴリズム[4]は、ラックシステムの部材破断時における部材同士の接触や、フォークリフトとラックシステムの衝突時における両者の構成部材同士の接触表現に用いられている。

この接触アルゴリズムでは、接触判定された要素の組を図2に示すようにギャップ要素で拘束する。ギャップ要素を介して要素間に生じる力を伝達させることで、接触力を表現している。また、接触後の両要素の離反の様子を表現する接触解除アルゴリズムでは、ギャップ要素によって拘束されている4つの節点の接触開始から現在までの全体座標系におけるX、Y、Z軸方向の変位のうち、いずれか一つがその最大値のある割合以下になった場合に接触を解除する。

b) ペナルティ理論に基づく接触アルゴリズム

本研究では、ラックシステムの荷物搭載面と荷物間での接触など、平面とはり要素間での接触や滑りを表現するため、磯部ら[5]の研究で用いられた接触アルゴリズムを使用した。この研究では、ラックシステム中の荷物搭載面や壁面を数値的に定義し、その平面と荷物を構成するはり要素間での接触をペナルティ理論に基づく接触アルゴリズム[6,7]で表現することで、ラックシステム上の荷物の挙動を再現していた。

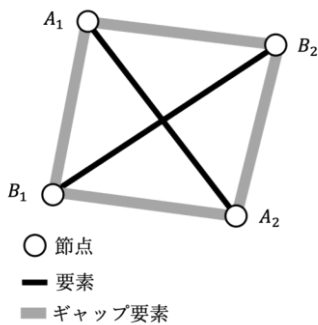


図2 ギャップ要素による2要素の拘束の様子

このアルゴリズムにおいて、接触判定された平面-要素間、あるいは2つの要素間には、ペナルティ接触理論に基づいた2種類の接触力が作用する。

1つ目の接触力は式(2)に示すペナルティ力 \vec{F}_P であり、接触面の法線方向にのみ作用する。

$$\vec{F}_P = \alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\vec{n}}{\|\vec{n}\|} \quad (2)$$

ここで、 α はペナルティ定数、 q はペナルティ指数、 \vec{n} は接触面の法線ベクトル、 l は要素軸間距離、 L は接触要素両端の各節点と平面との距離の平均値である。

2つ目の接触力は動摩擦力 \vec{F}_D であり、接触面の接線方向と法線方向にそれぞれ作用する。動摩擦力 \vec{F}_D はその接線方向成分 \vec{F}_T 、法線方向成分 \vec{F}_N を用いて以下のように表される。

$$\vec{F}_D = \vec{F}_T + \vec{F}_N \quad (3)$$

\vec{F}_T, \vec{F}_N は相対速度ベクトル \vec{v} の各方向成分 v_T, v_N に対して逆方向にそれぞれ作用し、以下の式(4)、(5)でそれぞれ表される。

$$\vec{F}_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\vec{v}_T}{\|\vec{v}\|} \quad (4)$$

$$\vec{F}_N = -D_C \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{\vec{v}_N}{\|\vec{v}\|} \quad (5)$$

ここで、 μ は動摩擦係数、 D_C は減衰に関する定数である。

c) ラックシステムへの反作用力の考慮

本研究では、軽量のラックシステムに重量のある荷物を搭載するため、ラックシステムと荷物が接触した場合には、ラックシステムにも反作用力として接触力を作用させる必要がある[5]。

任意の平面に要素が接触した場合、まず平面上の接触位置を比で表現し、それを利用して正規化された座標上にその位置 (s, t) を投影する。そして、次の形状関数を用いて正規化された面内の力の分布を求める。

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-s)(1-t) \quad (6a)$$

$$N_2 = \frac{1}{4}(1-s)(1+t) \quad (6b)$$

$$N_3 = \frac{1}{4}(1+s)(1+t) \quad (6c)$$

$$N_4 = \frac{1}{4}(1+s)(1-t) \quad (6d)$$

これらの形状関数を用い、平面を構成する4節点に分配される接触力 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4$ を次式により求める。

$$\vec{F}_1 = N_1(\vec{F}_p + \vec{F}_T + \vec{F}_N) \quad (7a)$$

$$\vec{F}_2 = N_2(\vec{F}_p + \vec{F}_T + \vec{F}_N) \quad (7b)$$

$$\vec{F}_3 = N_3(\vec{F}_p + \vec{F}_T + \vec{F}_N) \quad (7c)$$

$$\vec{F}_4 = N_4(\vec{F}_p + \vec{F}_T + \vec{F}_N) \quad (7d)$$

d) 接触パラメータの調整

b)で述べたペナルティ理論に基づく接触力の計算に関するパラメータは、先行研究[5-7]を参考に以下のように決定した。

- ・ペナルティ定数 α ：荷物の重量 [kgf]
- ・ペナルティ指数 q ：1
- ・動摩擦係数 μ ：静止摩擦係数の80%
- ・減衰に関する定数 D_c ：ペナルティ係数 α の30%

ただし、荷物のパレット部分(3章(2)節参照)同士が接触する場合においては、パレット部分に要素が集中していることが原因と思われる過剰な接触力が発生したため、ペナルティ係数 α の値を上記の値からさらに50%減少させた。

3. 解析モデル

(1) ラックシステムの解析モデル

本研究では、ラックシステムの解析モデルとして、先行研究[2,5]で用いられていたGodrej社[8]のラックシステムをモデル化したものを使用した。ラックシステムモデルの構成を図3に、寸法を図4に、各部材の材料定数を表1にそれぞれ示す。モデル化には線形Timoshenkoはり要素を用いた。ラックシステムの構成部材同士は、六角ボルト等を用いて接合されている。それらの破断条件[9]を表2に示す。支柱-ビーム間については、ビーム端部に存在するフックによって両者を接続し、さらにビームピンと呼ばれるZ型のピンによって両者を固定する形をとっている。このビームピンの回転剛性を表現するため、10 [mm]の微小要素を用いた。

(2) 搭載する荷物の解析モデル

本研究では、ラックシステムに搭載する荷物モデルとして、図5に示すように、荷物をパレットと一体化したモデルを用いた[5]。荷物部分の質量は100 [kg]、パレット部分の質量は10 [kg]であり、モデル1つあたりの質量は110 [kg]である。荷物は骨組構造としており、パレットは支柱やビームとの接触時にすり抜けることを防ぐため、1要素

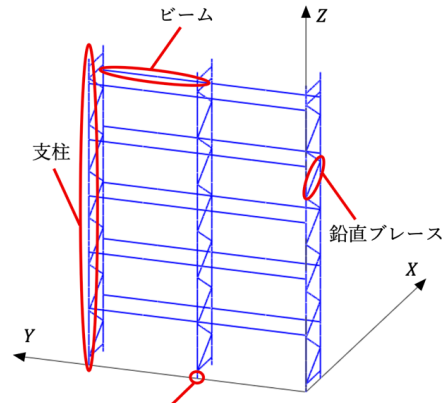


図3 ラックシステムモデルの構成

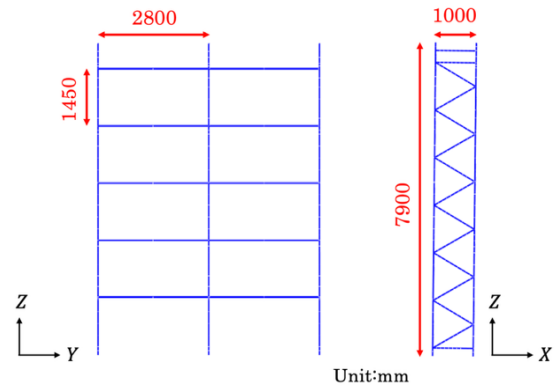


図4 ラックシステムモデルの寸法

表1 材料特性

	弾性係数 [GPa]	降伏応力 [MPa]	ポアソン比	密度 [kg/mm ³]
支柱	2.1×10^5	355	0.3	7.85×10^{-6}
鉛直ブレース	2.1×10^5	255	0.3	7.85×10^{-6}
ビーム	2.1×10^5	255	0.3	7.85×10^{-6}
ベースプレート	2.1×10^5	355	0.3	7.85×10^{-6}

表2 接続部の破断条件[9]

項目	接続される部材	破断条件
六角ボルト (M10)	支柱-鉛直ブレース(1本) 支柱-ベースプレート(2本)	引張軸力 ≥ 25.1 kN or せん断力 ≥ 13.9 kN
六角ボルト (M12)	ベースプレート-地面(2本)	引張軸力 ≥ 36.4 kN or せん断力 ≥ 20.2 kN
ビームピン	支柱-ビーム	せん断力 ≥ 6.04 kN
フック		せん断力 ≥ 26.5 kN or 曲げモーメント ≥ 1.5 kNm

200 [mm]の格子状の構造をとっている。

(3) フォークリフトの解析モデル

本研究では、フォークリフトモデルとして図6に示すモデルを使用した[2]。図6(a)において左側が車体、右側がフォークリフトに搭載された荷物であり、その総質量は3600 [kg]である。

4. 接触力伝達の確認

荷物をラックシステムに搭載した際に反作用力(2章(2)節c項参照)が適切に伝達されていることを確認するため、ラックシステム全体にかかる軸力の推移を調べた。図7に示すように1個あたり110 [kg]の荷物モデルを合計20個ラックシステムモデルに搭載し、同図中の6つの赤丸で示した点における軸力の合計値を算出した。その推移を図8に示す。

図8より、ラックシステム全体にかかる軸力の値は多少振動しているものの、振動の中心は-2600 [kgf]前後となっていることがわかる。また、これらの値の平均値は-2587.17 [kgf]であった。ここで、ラックシステムモデルの質量は423 [kg]、搭載している荷物モデルの合計質量は2200 [kg]より、ラックシステム全体の質量は2623 [kg]である。よって、ラックシステム全体にかかる軸力の大きさとラックシステム全体の質量は概ね一致しており、荷物荷重が適切にラックシステムに伝達されていることが確認できた。なお、軸力の振動の原因は、荷物を静置する際に生じる数値的な振動が原因と考えられ、今後改善が必要である。

次に、既存手法を用いた場合でも同様の軸力伝達の確認を行った。ここでも、1個あたり110 [kg]の荷物が合計20個搭載されている状況を想定し、ラックシステムモデル1段あたりに440 [kg]分の質量を部材密度としてビームの

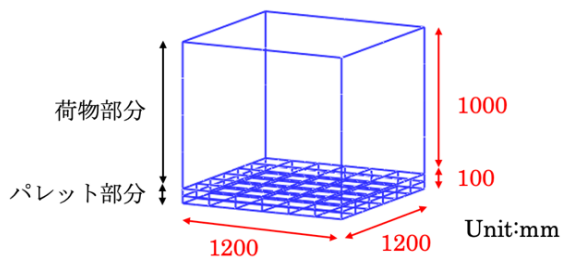
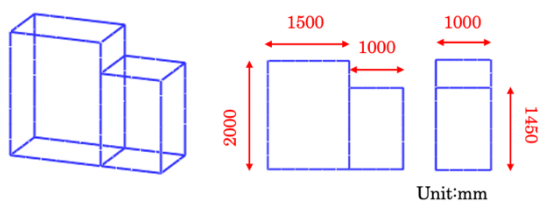


図5 荷物モデルの概要と寸法



(a) 概形

(b) 寸法

図6 フォークリフトモデルの概要

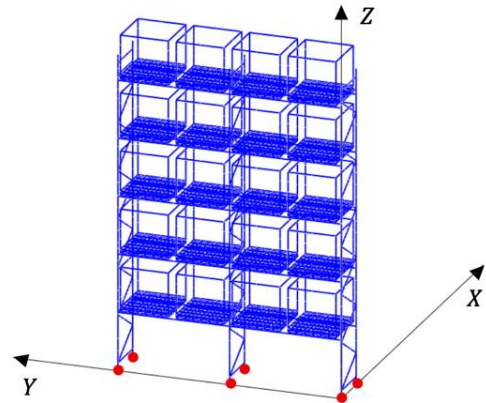


図7 軸力の測定位置

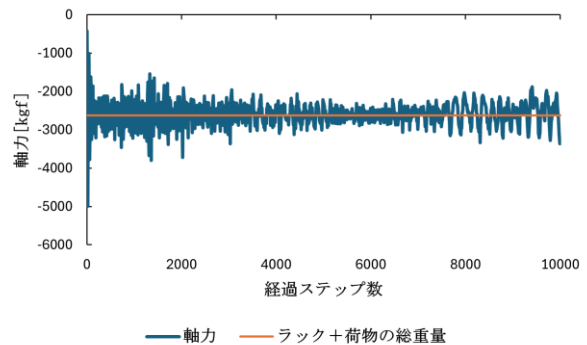


図8 荷物モデルを搭載した場合のラックシステム全体にかかる軸力の推移

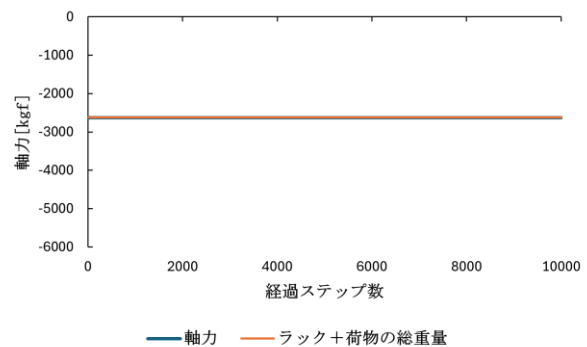


図9 荷物荷重を部材密度に換算した場合のラックシステム全体にかかる軸力の推移

構成要素に加えた。この手法でも、上記解析と同様にラックシステム全体にかかる軸力を算出した。その推移を図9に示す。

図9より、ラックシステム全体にかかる軸力はほぼ一定であり、その平均値は-2624.58 [kgf]であった。これは、ラックシステム全体の質量である2623 [kg]とほぼ等しい値である。よって、既存手法を用いた場合でも荷物荷重が適切に表現できていることが確認できた。

5. フォークリフト衝突時におけるラックシステムの挙動比較

続いて、提案手法を用いて行った荷物を搭載したラックシステムのフォークリフト衝突時挙動解析の解析結果を示す。また、既存手法でも同様の解析を行い、両者の手法での解析結果を比較し、搭載荷物をモデル化することの意義を考察する。

(1) 解析条件

フォークリフトモデルは、図10に示すA点あるいはB点に矢印のいずれかの向きに衝突するものとする。また、フォークリフトモデルは図11に示すように10 [km/h] (=約2.78 [m/s]) で走行し、時刻0.22 [s]にラックシステムモデルに衝突後、0.4 [s]間は等速で走行し、さらに0.4 [s]間線形的に減速した上で停止するものとする。また、荷物モデルは合計20個搭載する。

既存手法を用いた場合においても、使用するモデル、フォークリフトの走行条件等は全て上記解析と同一とした。ただし、搭載荷物はモデル化せずラックシステムモデル1段あたりに440 [kg]分の質量を部材密度としてビームの構成要素に加えている。

(2) 解析結果

図12から図19に解析結果を示す。なお、図12から図15が提案手法を用いた場合の挙動解析結果、図16から図19が既存手法を用いた場合の挙動解析結果である。

まず、図12から図15に示す提案手法と図16から図19に示す既存手法を比較する。既存手法では、フォークリフト

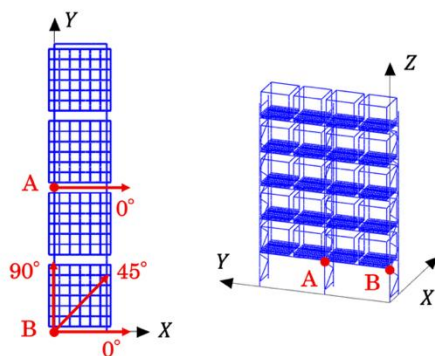


図10 フォークリフトの衝突位置

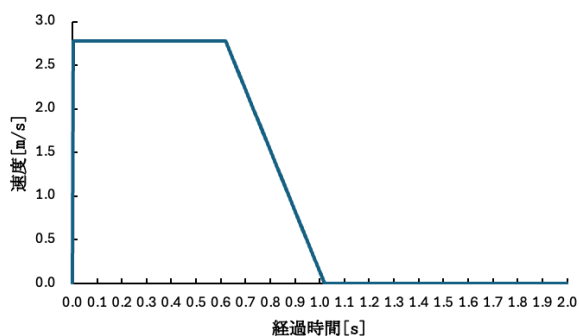
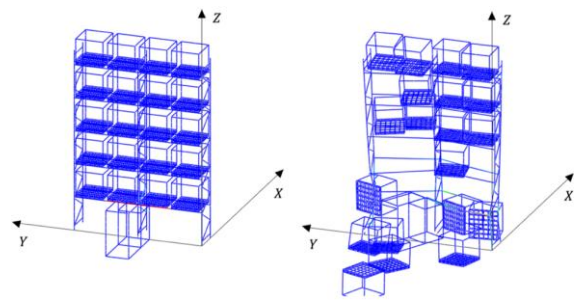


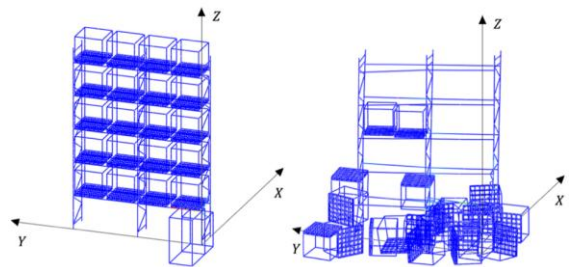
図11 フォークリフトの速度推移



(a) t=0.22 [s]

(b) t=10.0 [s]

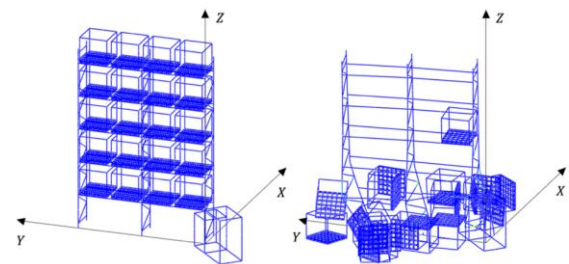
図12 提案手法の解析結果 (A点に0度方向衝突の場合)



(a) t=0.22 [s]

(b) t=10.0 [s]

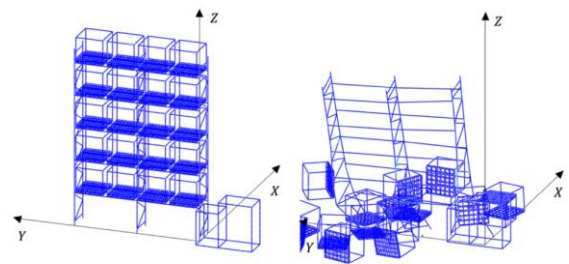
図13 提案手法の解析結果 (B点に0度方向衝突の場合)



(a) t=0.22 [s]

(b) t=10.0 [s]

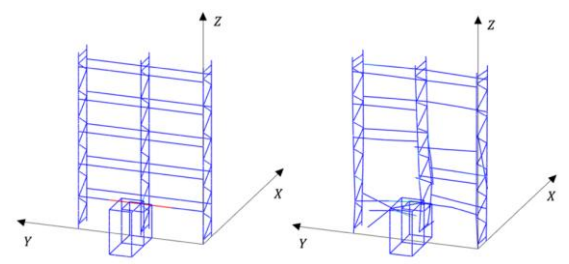
図14 提案手法の解析結果 (B点に45度方向衝突の場合)



(a) t=0.22 [s]

(b) t=10.0 [s]

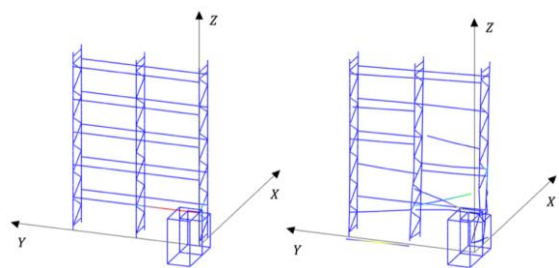
図15 提案手法の解析結果 (B点に90度方向衝突の場合)



(a) t=0.22 [s]

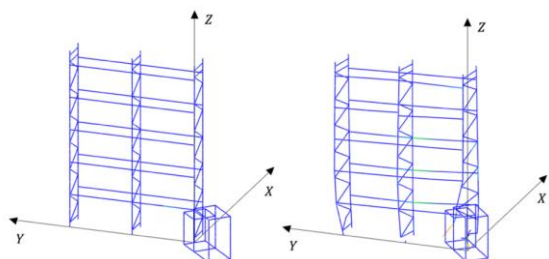
(b) t=10.0 [s]

図16 既存手法の解析結果 (A点に0度方向衝突の場合)



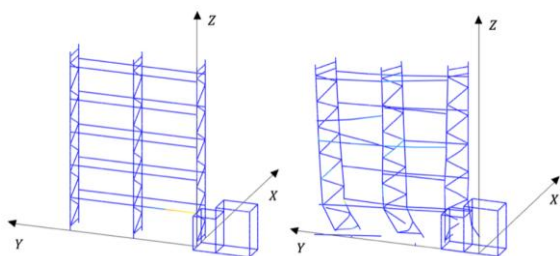
(a) $t=0.22$ [s] (b) $t=10.0$ [s]

図17 既存手法の解析結果 (B点に0度方向衝突の場合)



(a) $t=0.22$ [s] (b) $t=10.0$ [s]

図18 既存手法の解析結果 (B点に45度方向衝突の場合)



(a) $t=0.22$ [s] (b) $t=10.0$ [s]

図19 既存手法の解析結果 (B点に90度方向衝突の場合)

の衝突後も荷物荷重がラックシステムに残り続けるため、ラックシステムの部材が早期に破断しやすくなっている。それに対し、提案手法では、荷物の落下に伴ってラックシステム全体が軽量化するため、部材の破断が少なく力が構造全体に伝達しやすくなり、逆にラックシステムの傾きや変形量がより大きくなった。搭載荷物をモデル化することにより、荷物の落下やそれに伴うラックシステム全体の重量変化も考慮した挙動解析を行うことが可能となったと言える。

続いて、提案手法において、フォークリフトの衝突角度の違いによるラックシステムの挙動の変化を比較する。図13から図15を比較すると、同じB点にフォークリフトが衝突する場合であっても、0度方向衝突の場合よりも45度および90度方向衝突の方がラックシステムの変形がより大きくなっている。これは、ラックシステム中に存在する鉛直ブレースの向きが関係していると考えられる。0度方向衝突の場合ではフォークリフトの進行方向と同じ向きに鉛直ブレースが配置されているのに対し、45度および90度方向衝突の場合にはフォークリフトの進行方

向と鉛直ブレースの向きが一致しないため、結果としてより大きな変形を招いたと考えられる。

6. 結論

本研究では、荷物の移動や荷物-ラックシステム間の相互作用を考慮した連成解析手法を開発し、ラックシステムのフォークリフト衝突時挙動解析を実施した。その結果、荷物の落下やそれに伴うラックシステムの重量変化等の現象を再現することができた。

本研究の今後の課題は、モデルの振動や過剰な反発といった挙動の修正、荷物の質量を増やした場合への対応などである。

参考文献

- [1] Miracle as forklift truck driver walks out of factory unharmed after being trapped under tons of CHEDDAR CHEESE for nine hours after massive shelving collapse, Daily Mail (<https://www.dailymail.co.uk/news/article-3576799/At-one-person-missing-warehouse-collapsed-Shropshire.html>).
- [2] D. Isobe, B. Xie, U.N. Narayanan and N. Veeraraghavan : A numerical investigation on methods to prevent progressive collapse of pallet rack systems subjected to impact loads, *Thin-Walled Structures*, Vol. 216, Part C, 2025, 113743.
- [3] D. Isobe : Progressive Collapse Analysis of Structures : Numerical Codes and Applications, Elsevier, eBook ISBN : 9780128130421, Paperback ISBN : 9780128129753, 2018.
- [4] 磯部 大吾郎, レティタイタン : 高層建築物の火災時崩壊挙動に関する数値解析的検証, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 76, No. 667, pp. 1659-1664, 2011.
- [5] 磯部 大吾郎, 原 隆一郎 : 荷物を積載したパレットラックシステムの地震時挙動解析, 日本機械学会第38回計算力学講演会(CMD25), No. 25-50, 2025.
- [6] 磯部 大吾郎, 山下 拓三, 田川 浩之, 金子 美香, 高橋 徹, 元結 正次郎 : 有限要素法を用いた地震時における家具の挙動解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 80, No. 718, pp. 1891-1900, 2015.
- [7] 三浦 利季, 小林 康一, 山下 拓三, 田中 聖三, 磯部 大吾郎 : RC造建物内に配置した耐震家具の地震時挙動解析, 日本計算工学会論文集, Vol. 2018, No. 2, p. 20182005, 2018.
- [8] Godrej (<https://www.godrej.com/>).
- [9] EN 1993-1-8, Table of design properties for metric hexagonal bolts M5 to M39 (stress area, shear strength, tensile strength, bearing strength). Eurocode Applied.com, 2005. <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/bolt-design-properties>.