

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

Seismic Behavior Analysis of a Fully Loaded Pallet Rack System

○正 磯部 大吾郎^{*1}, 原 隆一郎^{*2}

Daigoro ISOBE^{*1}, Ryuichiro HARA^{*2}

^{*1} 筑波大学 University of Tsukuba

^{*2} 株式会社日立システムズ Hitachi Systems, Ltd.

Pallet rack systems used to store cargo in logistics warehouses can collapse during earthquakes, causing progressive collapse of the entire rack. In this study, a coupled analysis method was developed to calculate the contact force based on the penalty contact theory and to consider the action and reaction forces between the pallet rack system and the cargo. The results of the seismic behavior analysis of the pallet rack system, conducted using the ASI-Gauss code, showed that the natural period changed in varying conditions of the loading levels and weights of the cargoes. In the fully loaded condition, the fall of the cargoes was simulated as the seismic response increased.

Key Words : Pallet rack system, Cargo, Seismic behavior analysis, Finite element method, ASI-Gauss code

1. 緒 言

インターネット通販の急速な普及により貨物量が増加し、物流倉庫の需要が拡大している。物流倉庫において、荷物を保管するためにスチール製のラックが一般的に使用されている。中でも、パレットラックシステムは荷物をパレットと呼ばれる荷役台の上のせて保管される倉庫において最も一般的なラックである。

他方、日本は世界有数の地震大国であり、これまでに多くの地震が発生し様々な被害を受けてきた。日本の物流倉庫もその例外ではない。建築基準法の改正により、倉庫自体が倒壊するといった被害は減少しているが、ラックシステムの崩壊や荷物の落下・破損などの問題は無くなっていない。実際に日本倉庫協会の調査⁽¹⁾によると、熊本地震では、熊本県内の 79.4%の倉庫でラックの崩壊や荷崩れなどによって荷物に被害が出ている。ラックの崩壊は内容物の破損のみならず、物流機能の停止や人的被害にも発展するため、地震対策を強化する必要がある。

倉庫での地震対策として、落下防止バーや荷滑り防止マットといったものから、制振装置といったものまで数多く存在する。これらの効果の検証方法として実際のラックを振動台に載せて加振実験をするものが主流である。しかし、地震波やラック構造、荷物の条件などを変更するたびに実験を行うと莫大なコストや時間を要するため、繰り返し実験を行うことは困難である。そのため、ラックやその上の荷物の地震時挙動を容易に検証可能とする数値解析手法の確立が期待されている。

フォークリフトが衝突した際のラックシステムの進行性崩壊解析⁽²⁾では、ラックの部材密度を調整することで荷物を搭載している状況を再現していた。しかし、この手法では荷物の移動・衝突・落下などによる影響を考慮できないという問題があった。そこで本研究では、ASI-Gauss 法⁽³⁾にペナルティ法による接触理論⁽⁴⁾を導入し、さらに荷物とパレット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た。本稿では、パレットラックシステムの地震時挙動の再現を試みた結果について示す。

2. 解析モデル

本研究では、Godrej 社⁽⁵⁾で実際に使用されているラックシステムをモデル化した。その構造は図 1 に示すように支柱、ビーム、鉛直ブレース、ベースプレートからなる。各々の部材の弾性係数は 2.1×10^5 GPa、ポアソン比 0.3、密度 7.85×10^{-6} kg/mm³ であり、支柱とベースプレートの降伏応力は 355 MPa、ビームと鉛直ブレースの降伏応力は 255 MPa である。支柱とビームの断面形状は図 2 に示すように中空断面となっている。これらの部材を線形要素はり要素でモデル化し、図 3 に示すように高さ 7900 mm、幅 5600 mm、奥行き 1000 mm のラックに高さ

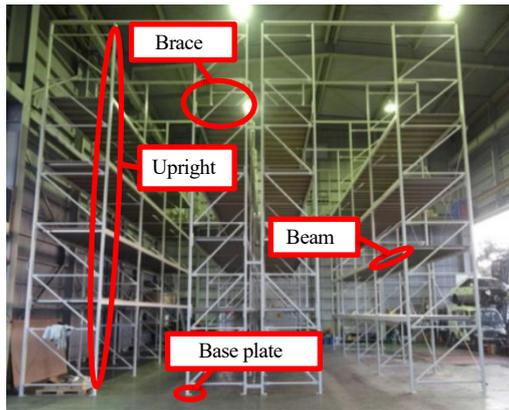


Figure 1 Configuration of a pallet rack system

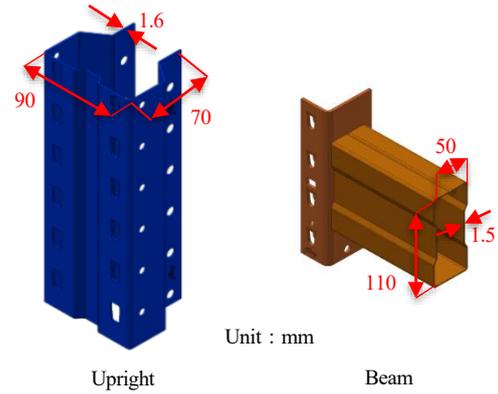


Figure 2 Cross-section of upright and beam

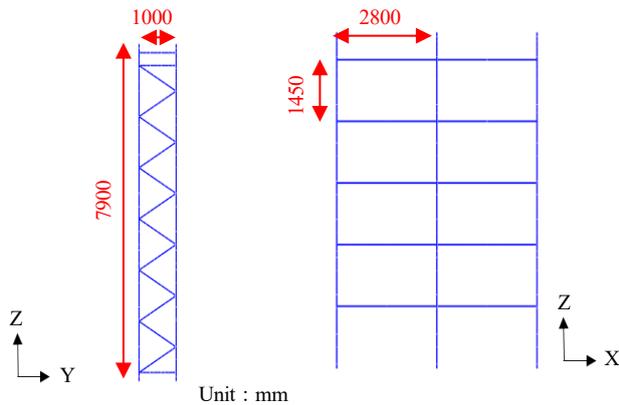


Figure 3 Numerical model of a pallet rack system

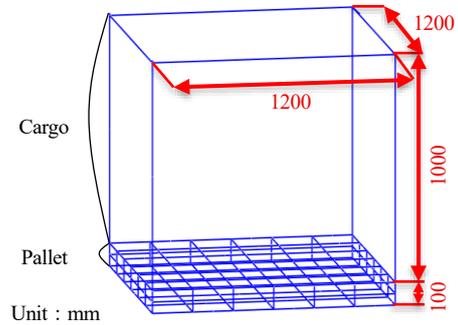


Figure 4 Numerical model of a cargo with a pallet

1450 mm 毎にビームを設置した。また、鉛直ブレースと支柱の接続部には M10 の六角ボルト、ベースプレートと支柱の接続部には 2 本の M12 の六角ボルトが使用されており、ビーム-支柱間はビーム端部のフックで支柱に接続された後に、ビームピンと呼ばれる Z 型のピンで固定されている。このビームピンには 10 mm の微小要素を用い、Godrej 社による要素試験から得た回転剛性を導入した。

本研究では荷物とパレットは一体となっているものとして扱い、図 4 に示すように幅と奥行き 1200 mm、高さ 1100 mm の箱としてモデル化し、質量 10 kg となるように密度を設定した。ただし底部のパレットは、ビームや支柱との接触を考慮するため、幅 200 mm の格子状に要素分割した。

3. 接触力と反作用力の考慮

ペナルティ接触理論に基づく接触アルゴリズムでは、位置情報に基づいて接触が判定された 2 つのより要素について、法線方向の食い込み量に応じて作用するペナルティ力 F_p と、接線方向および法線方向にそれぞれ作用する動摩擦力 F_T, F_N の合力を発生させることにより、物体間の接触や滑りを表現する⁽⁴⁾。それぞれの力は以下の式で定義される。

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

$$F_T = -\mu\alpha \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{v_T}{\|v\|} \quad (2)$$

$$F_N = -D_c \left(1 - \frac{l}{L}\right)^q \frac{v_N}{\|v\|} \quad (3)$$

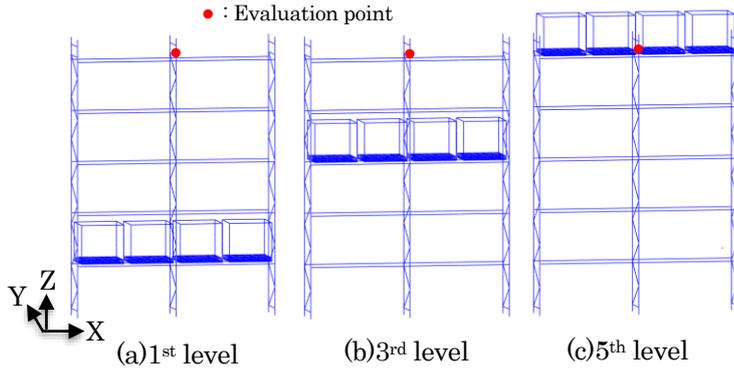


Figure 5 Numerical model with cargoes on each level

Table 2 Natural period obtained by the analysis

	110 kg	310 kg	510 kg
1 st level	0.216 s	0.222 s	0.220 s
3 rd level	0.296 s	0.394 s	0.462 s
5 th level	0.386 s	0.564 s	0.776 s

ここで、 α はペナルティ定数、 q はペナルティ指数、 μ は動摩擦係数、 D_c は減衰に関する定数、 l は要素軸間距離、 L は接触する2つの要素の部材幅平均値、 \mathbf{n} は接触面の法線ベクトル、 \mathbf{v} は要素間の相対速度、 $\mathbf{v}_T, \mathbf{v}_N$ はそれぞれ接線方向、法線方向への相対速度成分である。本研究では、 α を荷物の質量[kg]、 q を1、 μ を静止摩擦係数の80%、 D_c を α の30%とし、この手法により数値的に平面を定義したラック面から荷物への作用力を考慮した。重量の軽いラックシステムに対する荷物の移動による影響は無視できないため、本研究ではさらに以下に示すように荷物からラック面への反作用力を考慮した。

ラック面上の任意の位置に荷重が作用した際に、その位置座標を正規化して(s, t)とし、周囲の4つの節点に分配する接触力 \mathbf{F}_i を以下の式で求める。

$$\mathbf{F}_i = N_i(\mathbf{F}_P + \mathbf{F}_T + \mathbf{F}_N) \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (4)$$

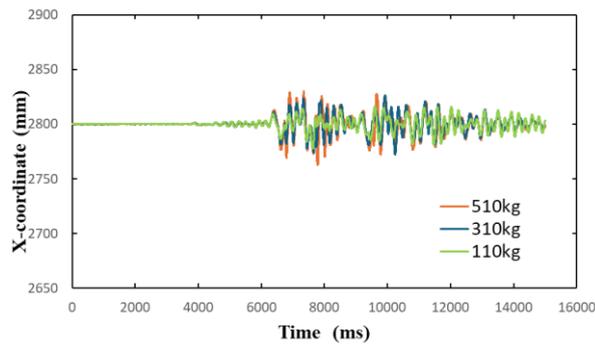
ここで、上式に用いられる形状関数は以下に示すものである。

$$N_1 = \frac{1}{4}(1-s)(1-t), \quad N_2 = \frac{1}{4}(1-s)(1+t), \quad N_3 = \frac{1}{4}(1+s)(1+t), \quad N_4 = \frac{1}{4}(1+s)(1-t) \quad (5)$$

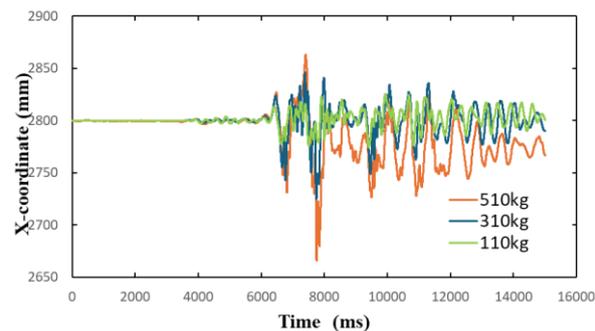
以上のアルゴリズムを ASI-Gauss 法の解析コードに導入し、ラックの水平面および鉛直平面に適用した。自重解析を実施した結果、ラックシステムの脚部に作用する軸力の総和に荷物の重量が反映されていることを確認した。さらに、荷物1つの重量を110 kg, 310 kg, 510 kg (内10 kgはパレットの重量)の3段階、その荷物4つを図5に示すように1段目、3段目、5段目に積載した全9パターンでの自由振動解析を実施し、固有周期の変化を確認した。解析結果をまとめたものを表2に示す。1段目に荷物を積載した場合にはあまり固有周期の変化はないが、3段目、5段目の高い位置に荷物を積載した場合には、積載重量が重くなるにつれ、同じ段に積載した場合でも固有周期が長くなっている。また、荷物の重量を固定した場合には、積載段が高くなるにつれてやはり固有周期が長くなっており、荷物の重量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る。さらに、JMA 神戸波を入力とした際のラックシステムのX軸方向への応答変位を図6に示す。荷物の搭載段が高く、また、荷物の重量が重くなるほどラックの変位が大きくなり、位相もわずかに大きくなっている。3段目に510 kgの荷物を載せた際に最大変位を記録しているが、これはこの際の固有周期が神戸波のX軸方向卓越周期の約0.4 sと近い値であるためと考えられる。また、最大値を観測した8 s付近でラック部材の一部が塑性化したため、振動の中心がX軸負の方向にずれている。

4. 荷物を満載したパレットラックシステムの地震時挙動解析

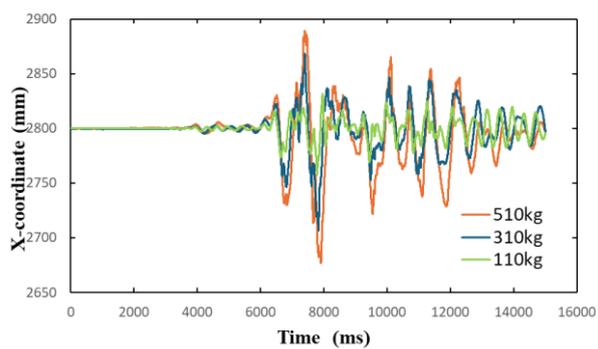
次に、全段に計20個の荷物を積載しJMA 神戸波を入力した際の地震時挙動解析結果を図7に示す。揺れが大きくなる8 s付近から荷物同士が衝突を繰り返す、ついには上層部の荷物が落下した。複数の荷物がラックシステムと衝突しているため全体の振動が減衰し、図8に示すように図6(c)と比べると応答が抑えられている。



(a) 1st level

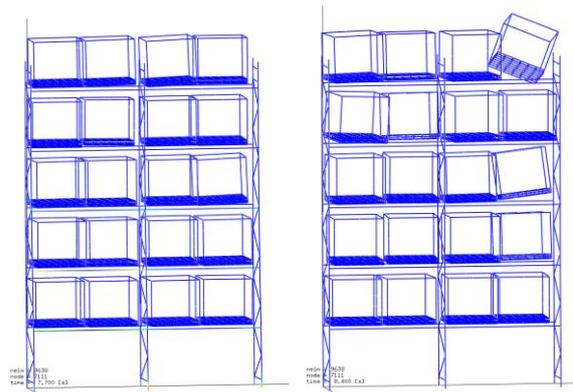


(b) 3rd level



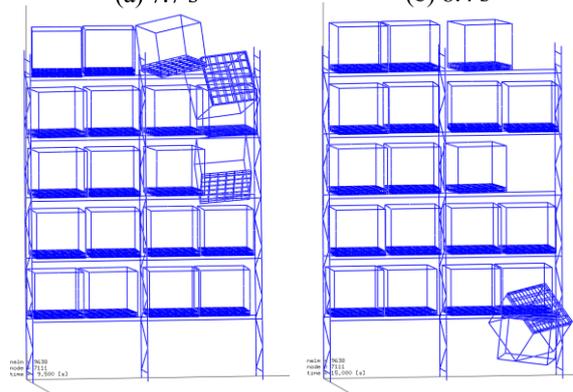
(c) 5th level

Figure 6 Seismic response of the pallet rack system with cargoes of varying mass installed at varying levels



(a) 7.7 s

(b) 8.4 s



(c) 9.5 s

(d) 15.0 s

Figure 7 Seismic behavior of cargoes on a pallet rack system

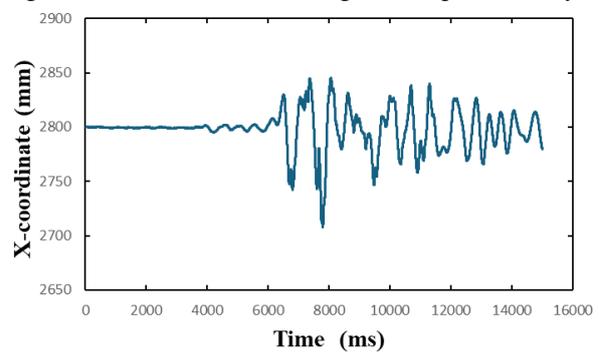


Figure 8 Seismic response of the fully loaded pallet rack system

5. 結 語

今後は、パレットラックシステムの進行性崩壊まで解析可能なシステムを構築する予定である。

文 献

- (1) 一般社団法人日本倉庫協会, <https://www.nissokyo.or.jp/>.
- (2) Isobe, D., Xie, B., Narayanan, U.N., and Veeraghavan, N., “A numerical investigation on methods to prevent progressive collapse of pallet rack systems subjected to impact loads”, *Thin-Walled Structures*, (2025), to be published.
- (3) 磯部大吾郎, はり要素で解く構造動力学: 建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで Fortran90・C++ソースコード付, 丸善出版, ISBN:978-4-621-30544-7, (2020).
- (4) Isobe, D., Yamashita, T., Tagawa, H., Kaneko, M., Takahashi T., and Motoyui, S., “Motion Analysis of Furniture under Seismic Excitation using the Finite Element Method”, *Japan Architectural Review*, Vol. 1, No. 1 (2018), pp.44–55.
- (5) Storage Solutions, Godrej & Boyce Mfg Co Ltd., <https://www.godrej.com/>.