

物流倉庫ラックの 進行性崩壊に関する数値解析的検討

Numerical Investigation on Progressive Collapse of Rack Systems in Warehouse

千葉賢¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Satoru Chiba 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: s2020857@s.tsukuba.ac.jp)

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

In this paper, an investigation was conducted using numerical analysis on progressive collapse of rack systems in warehouse. The Adaptively Shifted Integration (ASI) - Gauss code, which can stably calculate non-linear phenomenon such as member fracture and contact, was used as a numerical code in this research. The numerical results show that the occurrence of progressive collapse of rack systems depends on load capacity. Furthermore, it was shown that the introduction of horizontal braces at the top of rack systems could suppress the deformation and thus the occurrence of progressive collapse.

Key Words : Rack System, Progressive Collapse, ASI-Gauss Technique

1. 序論

物流倉庫において、荷物を保管するために鋼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 (図-1[1]) は、荷物をパレットと呼ばれる荷役台の上に乗せて保管する倉庫において使用される最も一般的なラックである。このパレットラックが用いられる物流倉庫において、荷物の入出庫には一般的にフォークリフトが用いられる。その際に、フォークリフトがラックに衝突することで1列のラックが崩壊し、倉庫内のラック全体に連鎖的に崩壊が広がってゆく現象、いわゆる進行性崩壊現象が問題になっている[2]。倉庫内で大規模なラックの崩壊が発生すると人命の損失に関わるだけではなく、経済的な損失が極めて大きくなる。

ラックの崩壊を抑制する方法に関する研究としては、1列のラックに対して数値解析を行った例[3]がある。ここでは、ラックに対して平面ブレースの崩壊抑制効果について検証しており、ラックの最上段に平面ブレースを設置することで、効果的かつ経済的にラックの崩壊を抑制することができるかと報告されている。

しかしながら、上記の研究において、解析対象となったのはラック1列であり、連結されたラックに対しての検証はなされていない。またラックの崩壊挙動までを解析で追うことはしていなかった。連結されたラックの崩壊挙動を把握し、効果的に崩壊対策を検討することは、物流倉庫内におけるラックの崩壊事故を未然に防ぐ上で極めて重要である。

そこで本研究では、連結されたラックに対して複数の異なる条件下で数値解析を行い、その崩壊挙動について調査する。その後、ラックの進行性崩壊に対する平面ブ



図-1 パレットラック [1]



図-2 ラック崩壊事故後の被害の様子 [2]

レースの崩壊抑制効果を検証する。なお、数値解析手法には、骨組構造物に対し、非線形性が強い解析でも安定的に解くことができ、接触および破断も考慮することができるASI-Gauss法[4]を用いた。

2. ラックの数値解析モデル

(1) 使用するラックの概要

本研究では、パレットラックを解析対象とする。その構造は図-3に示すように、支柱、ビーム、ブレース、天つなぎ、背つなぎ、ベースプレートと呼ばれる部材で構成されている。1列のラックは支柱、ビーム、ブレース、ベースプレートからなり、隣接するラックと背つなぎで接続され、通路を挟んで設置されるラックとは天つなぎで接続されている。ブレースはM10の六角ボルトを1本用いて支柱に接続され、天つなぎ、背つなぎ、ベースプレートはM10の六角ボルトを2本用いて支柱に接続されている。また、ベースプレートはM12の六角ボルトを2本用いて地面に固定されている。ビームは両端についたフックで支柱に接続されたのちに、ビームピンと呼ばれるZ型のピンで固定される。

本研究で解析対象とするパレットラックは、欧州規格

EN15512に従い、また、部材の材質はインド規格IS5986とIS2062に従うものとした。なお、ラックの1棚当たりの最大積載荷重は2000 kgである。

(2) 解析モデル

ラック1列の寸法は、図-4に示すように高さ7900 mm、奥行き1020 mm、ビーム長さは2800 mmであり、高さ1450 mm毎にビームを設置してある。ラックの奥行方向をCA方向(Cross Aisle direction)とし、ビーム方向をDA方向(Down Aisle direction)とする。パレットラックの全体解析モデルを図-5に示す。要素には線形Timoshenkoはり要素を使用している。本研究においてラックは2間口でビーム段数が5段のものを1列とし、3列モデル化した。なお、ラックに設置される荷物の重量を考慮するために、荷物とパレットの重量をビーム要素に密度として加えた。一方、荷物およびパレットの強度や形状は考慮していない。ラック1棚当たりの積載荷重(過積載の3000 kgを含

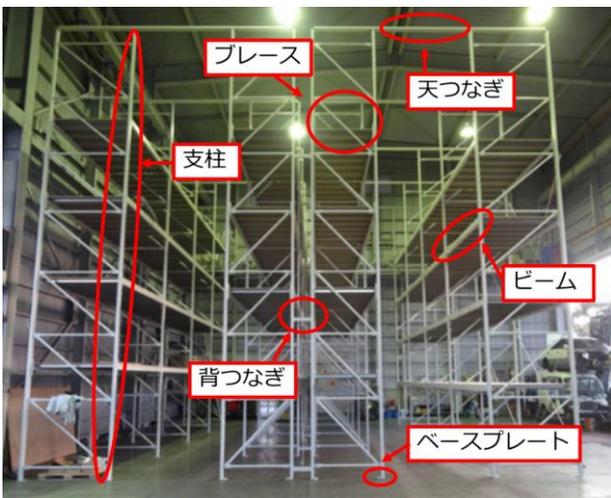


図-3 パレットラックの構造 [5]

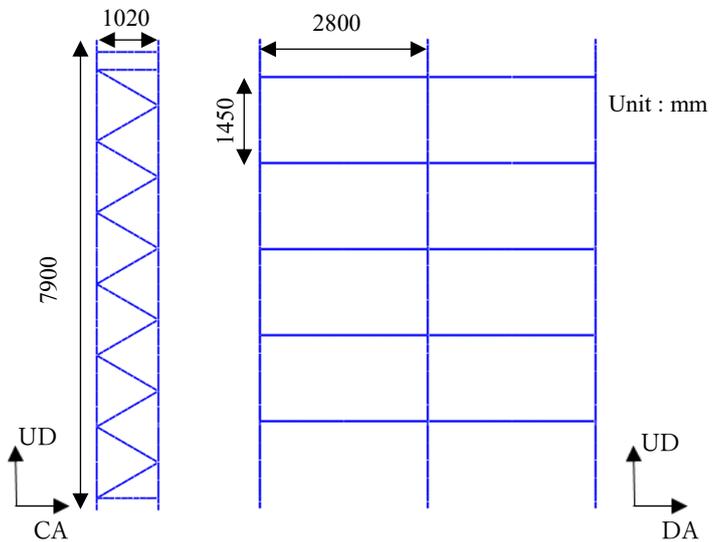


図-4 パレットラック (1列) の形状と寸法

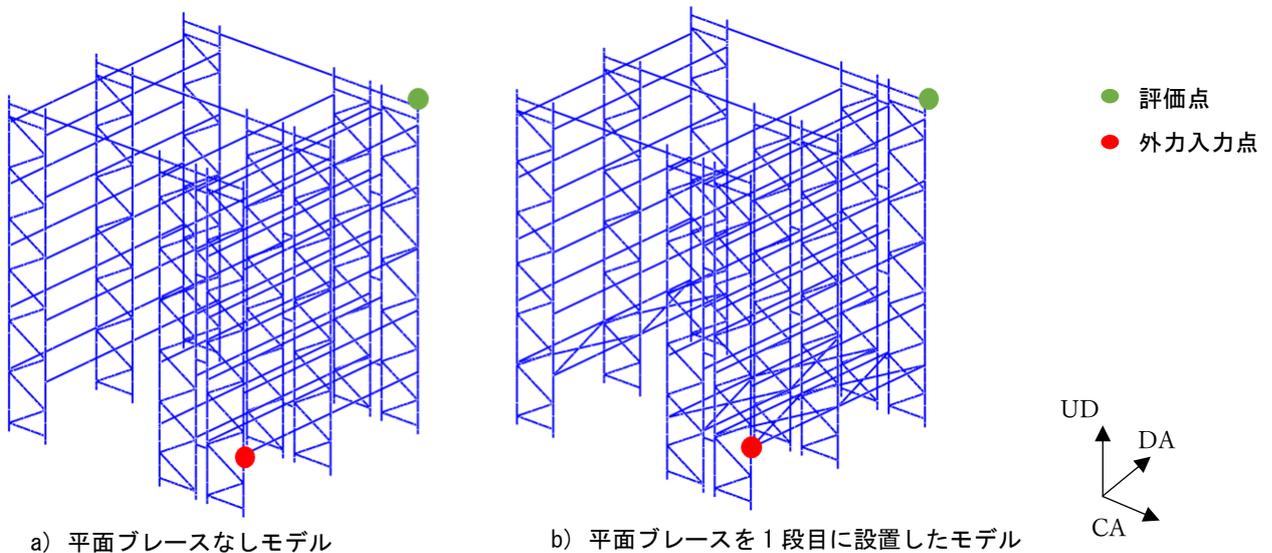


図-5 パレットラックの全体解析モデル

表-1 解析モデル一覧

No.	積載荷重[kg]	平面ブレースの設置段	要素数	節点数
case 1	0	無	2,567	2,367
case 2	2000	無	2,567	2,367
case 3	3000	無	2,567	2,367
case 4	3000	1段目	2,682	2,469
case 5	3000	最上段	2,682	2,469
case 6	3000	全ての段	3,162	2,877

む)と平面ブレースを設置する段数を変化させ、6つのモデルを作成した。作成した解析モデルを表1にまとめる。本研究では、基本的には1部材2要素で分割しているが、ブレースのみ座屈挙動を精度良く再現するために10要素分割とした上で、端部をピン接合としている。

3. パレットラックの崩壊解析

(1) 解析条件

本研究では、フォークリフトのラックへの衝突を想定し、ラックに衝撃的な外力を加える解析を行う。図-6に示す外力を図-5の外力入力点にCA負の方向に入力する。入力する外力の最大値は33.3 kNであり、この値は10.0 km/hで走行する6000 kgのフォークリフトが1秒後に0.0 km/hになると仮定し、運動量保存則と力積から設定した。また、入力する外力の時間増分は0.001 sであり、総解析時間は9.0 sである。

次に、ラックの構成部材を接続している六角ボルトおよび支柱とビームの接続部に関する破断条件に付いて述べる。六角ボルトの材質はSS400とし、材料の引張強さとボルトの有効断面積から破断条件を設定した。なお、せん断破断に関しては引張りの60%[6]とした。M10の六角ボルトは引張軸力が23.2 kN、せん断力が13.9 kN以上になった時に破断するようにし、M12の六角ボルトは引張軸力が37.1 kN、せん断力が22.2 kN以上になった時に破断するように設定した。また、支柱とビームの接続部に関しては実験から得られたものを使用し、せん断力が以下の値を超えた時に破断するように設定した。鉛直上方向とそれ以外の方向で分けており、鉛直上方向はビームピンの破断条件である6.04 kN、それ以外の方向にはフックの破断

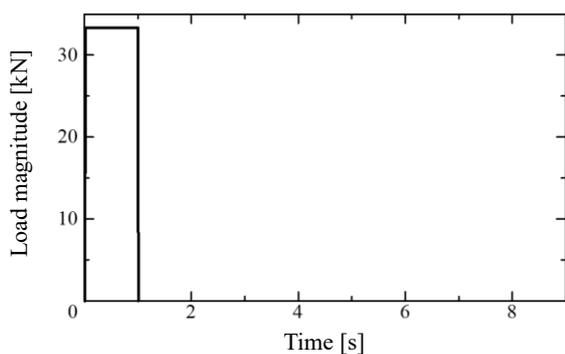


図-6 外力条件

条件である26.5 kNとした。接続部の破断曲げモーメントは1.5 kN・mとした。

本解析ではラックの崩壊挙動を調査し比較するにあたり、ラック最上段の水平方向変位を評価する。水平方向変位の評価点は図-5に示すように設定する。

(2) 解析結果

a) 積載荷重による崩壊挙動の調査

1棚当たりの積載荷重によるラックの崩壊挙動について調査する。解析結果の図-7より、case 3はcase 1, 2より評価点における水平方向変位が極めて増大していることが確認できる。また、case 1, 2においてブレースの座屈やビームの降伏が確認されたものの、崩壊は発生せず、case 3のみラックの崩壊が生じた。case 3の崩壊挙動の様子を図-8に示す。ビームや支柱の降伏と、ブレースの座屈を伴い、崩壊が進んでいく様子を確認することができる。また、通路を挟んで設置されたラックが天つなぎにより引っ張られることで、ラック上部のブレースが座屈し、崩壊していく様子が確認できた。以上より、1棚当たりの積載荷重が設定された最大積載荷重以下であれば、ブレースの座屈や部材の降伏は生じるが、崩壊は生じない。一方で、過積載の状態では、ブレースの座屈や部材の降伏に加え、ブレースと支柱をつなぐボルトがせん断破壊し崩壊が進行していく。また、天つなぎによって、通路を挟んで隣接するラックに崩壊が進行していく様子を確認できた。

b) 平面ブレースの崩壊抑制効果の検証

次に、ラックの崩壊に対する平面ブレースの抑制効果の検証を行う。図-7よりcase 3, 4に比べて、case 5, 6では水平方向変位が極めて小さくなっていることが確認できる。また、case 5とcase 6の水平方向変位の差が小さいことも同様に確認することができた。平面ブレースを設置した解析ではcase 4のみで崩壊が生じており、case 5, 6では崩壊は生じなかった。以上より、最上段にのみ平面ブレースを設置した場合には、全ての段に平面ブレースを設置する場合と同様の崩壊抑制効果が得られることが確認できた。図-9にcase 5の解析結果を示す。図-8と比較すると、平面ブレースをラックの最上段に設置することで、ブレースの座屈やラックの変形を抑制し、崩壊が抑制されて

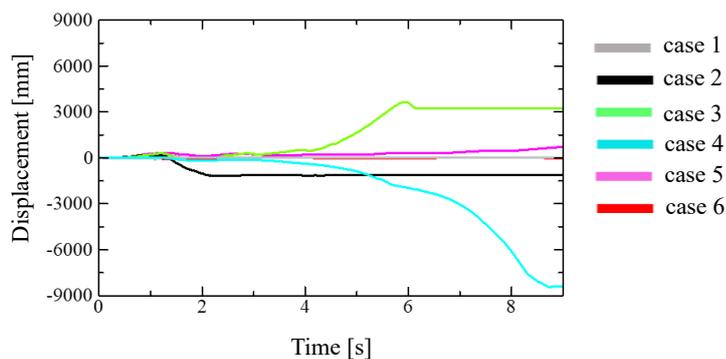


図-7 水平方向変位

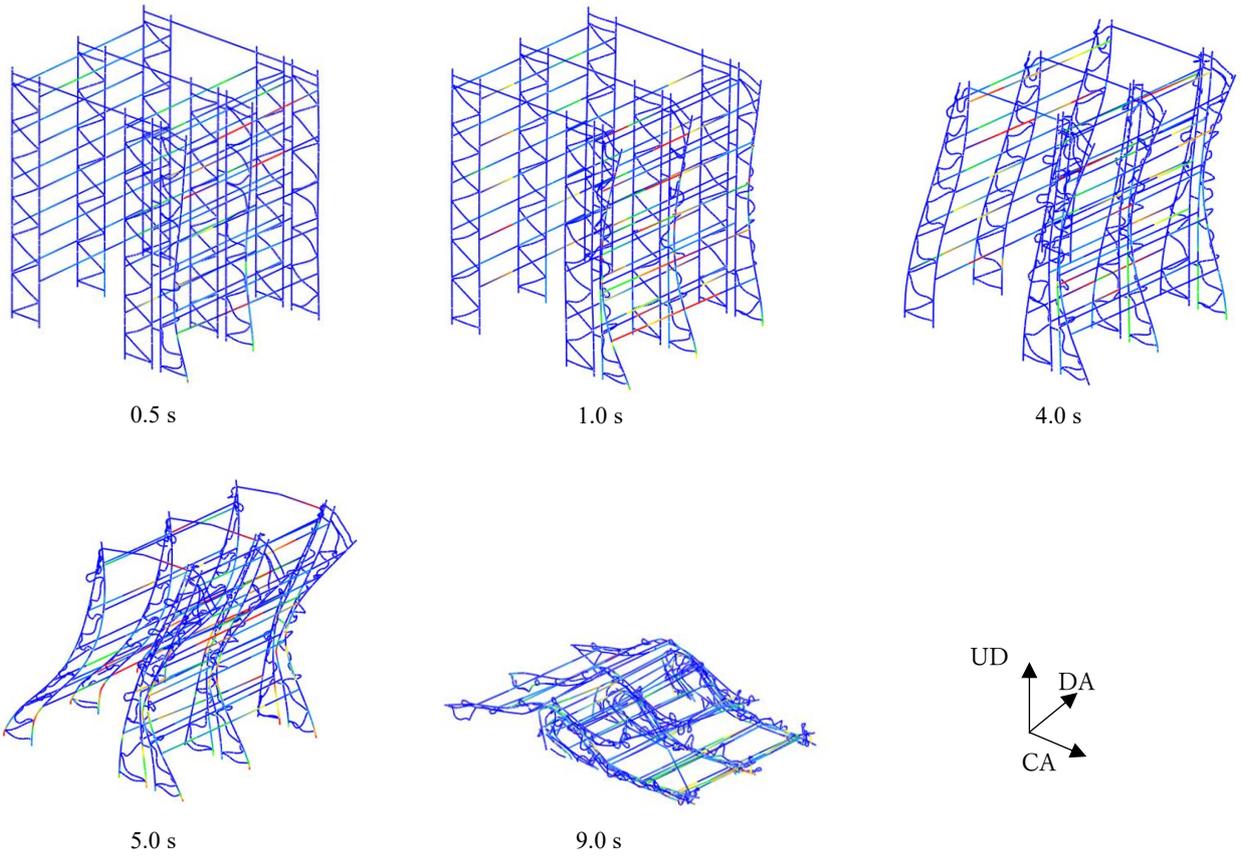


図-8 解析結果 (case 3)

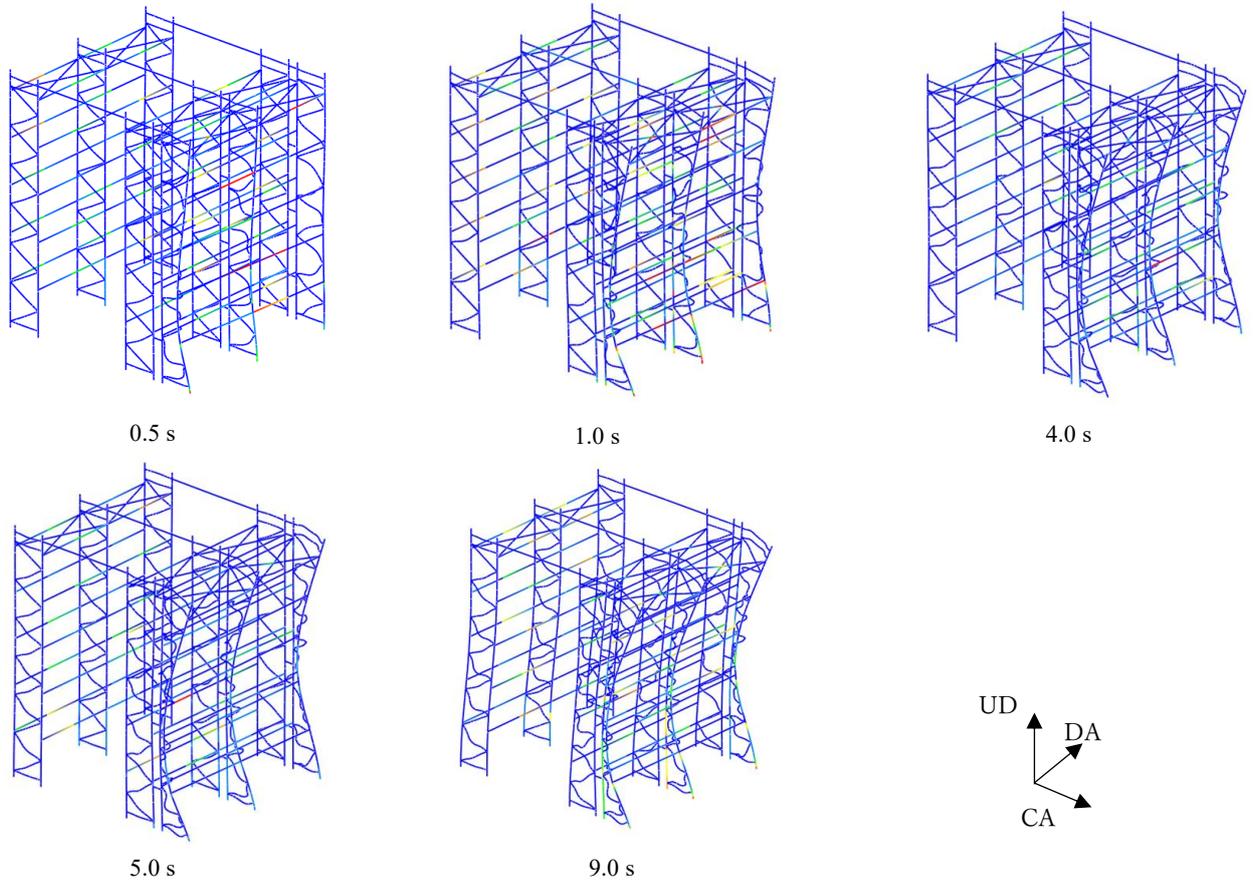


図-9 解析結果 (case 5)

いることが確認できる。

高層建築物において、ハットトラスシステムを上層部に設けることで、応力伝達経路が増し、全体強度が向上することが知られている[7]。case 5において崩壊抑制効果が大きく表れたのは、ラックの最上段に平面ブレースを導入することで、ラックに対しても建築物同様に応力伝達経路が増し、余剰強度が確保されたためだと考えられる。以上のことから、連結されたラックにおいて最上段に設置された平面ブレースが効果的かつ経済的に崩壊挙動を抑制できることが確認された。

4. 結論

本研究では、パレットラックの崩壊挙動について数値解析的に調査した上で、平面ブレースの崩壊抑制効果の検証を行った。その結果、過積載のラックでは、ビームや支柱の降伏とブレースの座屈を伴い崩壊が進行していき、天つなぎによって通路を挟んだラックが引っ張られ崩壊することが確認できた。また、先行研究[3]と同様に平面ブレースを最上段に設置することで、連結されたラックに対しても崩壊を効果的かつ経済的に抑制できることが示された。

今後は、実験により V&V を行い、モデルの妥当性を高めていく。そのためにラックに設置されるパレットや荷物の強度を考慮したモデルの作成を行う。最終的には倉

庫に設置される大規模なラックシステムのモデルを作成し、進行性崩壊を抑制する方法の検討を行う予定である。

参考文献

- [1] Shelving and Racking System, Inc (<https://www.srs-i.com/blogs/which-best-storage-racks-warehouse/>)
- [2] Miracle as forklift truck driver walks out of factory unhurt 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>), 11:18 GMT, 6 May 2016.
- [3] A.L.Y. Ng, et al.: Methods of restraining progressive collapse in rack structures, *Engineering Structures*, Volume 31, Issue 7, July 2009, Pages 1460-1468.
- [4] D. Isobe: Progressive Collapse Analysis of Structures: Numerical Codes and Applications, *Elsevier*, eBook ISBN: 9780128130421, Paperback ISBN: 9780128129753, 2018.
- [5] 株式会社 STEEL LABO (<https://www.steel-labo-shopping.com/jirei/p-004.html>)
- [6] 株式会社 ヨット印・ダイワ (<http://yds-hp.co.jp/kisotishiki.htm>)
- [7] 坪井善昭, 大泉楯, 原田公明, 鳴海祐幸, 小堀徹: [広さ][長さ][高さ]の構造デザイン, 建築技術, 2007.