

ねじのゆるみを考慮した電子装置用ラックの地震時挙動再現解析

Seismic Motion Analysis of Racks for Electronic Apparatus Considering Loosening of Screws

金野 圭祐^{*1}, 山下 拓三^{*2}, 〇正 磯部 大吾郎^{*3}Keisuke KANANO^{*1}, Takuzo YAMASHITA^{*2} and Daigoro ISOBE^{*3}^{*1} 株式会社アプクラフト AppliCraft Co., Ltd.^{*2} 防災科学技術研究所 National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience^{*3} 筑波大学 University of Tsukuba

In this study, we developed an effective numerical code to analyze the seismic motions of mechanical structure with screws. The numerical code was developed based upon the adaptively shifted integration (ASI)-Gauss technique. Loosening mechanism of screws was considered by employing a bearing-surface slip frequency dependent model. We carried out a shake-table test of a rack for electronic apparatus and simulated with three types of numerical models. The screw elements were not considered in the first numerical model. The screw elements were considered in the second numerical model; however, the loosening of screws was not considered. In the third numerical model, both the screw elements and the loosening mechanism were considered. As a result of each comparison, the numerical result of the third model agreed best with the test result. These results suggest that it is necessary to consider the loosening of screws when analyzing the seismic motions of mechanical structure with screws such as the racks.

Key Words : Rack, Seismic motion, Shake-table test, ASI-Gauss technique, Finite element method, Screw

1. 緒 言

現代の情報社会において、電子装置を常時安定的に運用することは非常に重要であり、それは地震による揺れにさらされている場合も同様である。特に地震による災害時に重要機器の故障や通信障害などが発生すれば、救命救助や避難のための活動の妨げにもなり、致命的となりうる。電子装置は、取り付け・取り外しの容易さや安価なことから、ボルトを用いてラックに固定されることが多いが、ボルトのようなねじは振動や衝撃などの動的な外力が作用するとゆるみが発生し、締結力が低下する。ねじゆるみに関する研究は、実験的手法⁽¹⁾や有限要素解析⁽²⁾により行われてきたが、解析に関する研究においてねじゆるみをモデル化し応用した事例は少ない。

防災科学技術研究所では、建築・土木・地盤構造物および室内の家具・什器類の地震被害や対策効果を高精度に再現する数値シミュレーションシステム（数値震動台、E-Simulator）の構築およびその活用のための研究開発を行っている⁽³⁾。本研究では、このプロジェクトの一環として、非構造部材の一つである電子装置用ラックの地震動に対する信頼性評価の手段の確立を目的とし、ねじ締結を有する電子装置用ラックの地震時挙動を数値解析によって再現することを試みた。解析コードは、大規模な骨組構造解析において計算コストを最小限に抑えることが可能な ASI-Gauss 法⁽⁴⁾をベースとし、それにねじゆるみのアルゴリズムを導入して、実験との比較によりその妥当性を検証した。

2. 座面すべり回数依存モデル

ねじのゆるみ機構のアルゴリズムには、泉他⁽⁵⁾のねじゆるみに関する詳細解析の結果を ASI-Gauss 法で用いる線形チモシェンコはり要素に適用し、最終的にねじのゆるみを急速に進行させる原因となる座面すべりによる締結力低下をモデル化した。図1のような2枚の板をボルトとナットで締め付けた状態を考えると、座面すべりの発生条件は、式(1)のように表せる。

$$F > \mu N \quad (1)$$

本研究では、まずねじゆるみを考慮する場合としない場合の解析結果への影響の違いを調べるため、任意定数の締結力低下率 a を仮定し、座面すべり発生毎に締結力 N が $a\%$ 低下するという単純な定式化により座面すべり発生後の締結力低下を表現した。座面すべり発生回数を n 、初期締結力を N_0 とし、締結力 N を式(2)のように定義した。これを「座面すべり回数依存モデル」と称する。

$$N \equiv N_0 \left(1 - \frac{a}{100}\right)^n \quad (2)$$

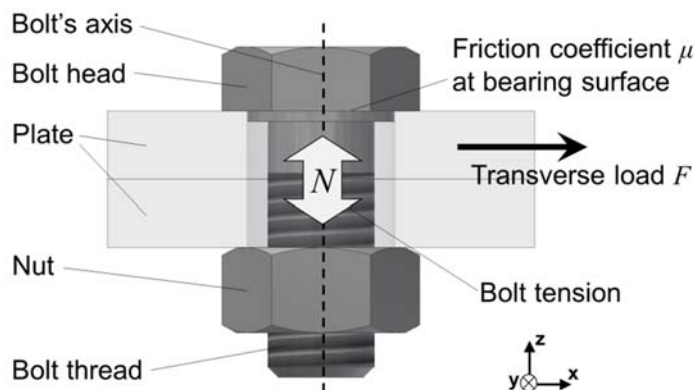


Fig. 1 Structural drawing of a bolted joint

3. 振動台実験の概要

振動台実験の概要と寸法情報をそれぞれ図 2、図 3 に示す。電子装置の代わりに擬似荷重を搭載したラックを振動台上に設置した架台にボルト固定して加振実験を実施した。搭載した擬似荷重の構成は、 $30\text{ kg} \times 14$ か所、 $20\text{ kg} \times 4$ か所の合計 500 kg である。擬似荷重はそれぞれ、ラック内部にある垂直柱にボルト固定されたレール状の支持金具に載せ、擬似荷重と垂直柱を 4 本の M5 ボルトおよびナットを用いて固定した。

実験には、最大加速度がそれぞれ水平方向 2.0 G 、鉛直方向 3.0 G で加振可能な株式会社 MTI の大型三軸振動台 (Multi Cargo Simulator) を用いた。地震波による加震の前に、スイープ試験によって装置全体の共振周波数を測定した。共振周波数は、X 軸方向: 7.8 Hz 、Y 軸方向: 18.4 Hz であった。加震波には、株式会社 MTI 保有の NTT 人工地震波 (1998 年 12 月版) を用い、架台の台上加速度とラック頂部の水平方向の変位を測定し、解析の結果と比較した。

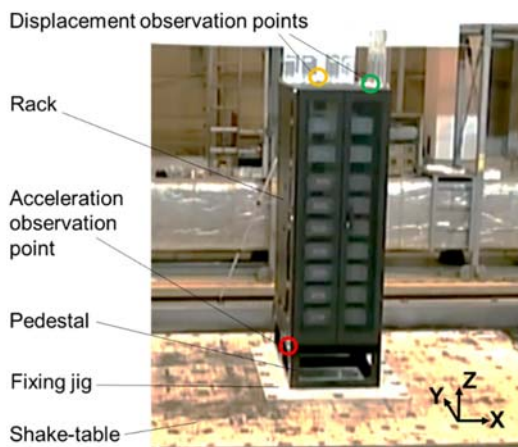


Fig. 2 An overview of shake-table test

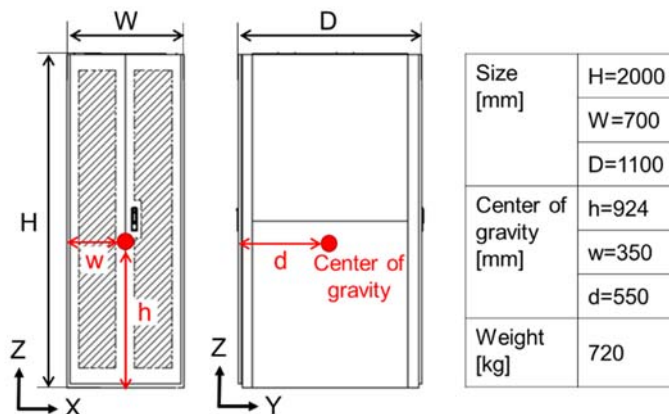


Fig. 3 Size and location of the center of gravity of the target

4. 解析モデルおよび解析条件

本研究では、図4に示すように線形要素を用いてねじ無しモデルとねじ付きモデルの2種類を作成した。ねじ要素もゆるみも考慮しないモデルを Model-A、ねじ要素は考慮するがゆるみは考慮しないモデルを Model-B、ねじ要素と座面すべり回数依存によるゆるみを考慮するモデルを Model-C とした。解析モデルの要素数および節点数は、ねじ無しモデルが 952 と 776、ねじ付きモデルが 1,168 と 956 である。

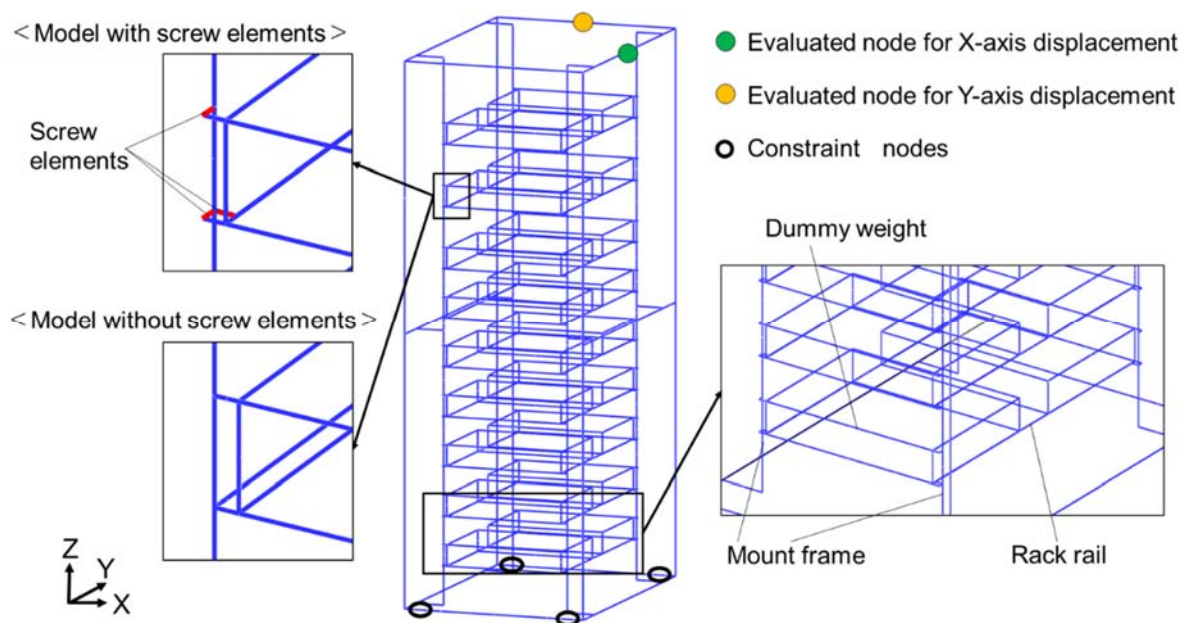


Fig. 4 An overview of the numerical model

実験で用いた部材はすべてスチールであるため、部材の材料特性はそれぞれ、ヤング率 $E = 205 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、降伏応力 $\sigma = 267.4 \text{ MPa}$ とし塑性変形を考慮した。部材の幾何学的特性は各部材の図面をもとに算出した。Model-C では座面すべり回数依存を考慮するため、座面すべりに関する定数をそれぞれ、座面摩擦係数 $\mu = 0.1$ 、初期締結力 $N_0 = 2500 \text{ N}$ 、締結力低下率 $a = 4\%$ と仮定した。

5. 解析結果と実験結果の比較・検証

実験結果とそれぞれの解析結果の変位の比較を図5に示す。Y軸方向変位はそれぞれの解析結果であまり変化はなかったが、X軸方向変位は3つのモデルで違いが見られた。

まず、Model-AのX軸方向変位を比較すると、実験結果の変位に比べ、解析結果の変位が大幅に小さくなるという結果となった。また、Model-Aの共振周波数は、X軸方向：15.8 Hz、Y軸方向：13.8 Hzとなり、X軸方向については実験結果よりも大きい値となった。なお、解析での共振周波数は、メッシュモデルの頂部にX軸方向、Y軸方向それぞれの強制変位を与えた後、自由振動させることにより求めている。Model-Aでは、擬似荷重や支持金具がボルトを介さず垂直柱に直接結合するようモデル化しているため、それぞれが補強材の役割を果たしてしまい、ラック全体の剛性が大きくなり過ぎたためと考えられる。

Model-BのX軸方向変位の結果の比較を見ると、解析では振幅の大きさがある程度一定であるのに対し、実験では時間が経つにつれ、振幅は大きく、周期は長くなっているように見える。Model-Bの共振周波数は、X軸方向：7.9 Hz、Y軸方向：11.0 Hzとなり加振前の段階では試験体に近い共振周波数を再現できているため、実際は加振中に共振周波数が下がっていることが考えられる。共振周波数に影響するのは、主に質量と剛性であるが、質量は不変であるため、剛性の変化が主な原因と考えられる。フレームの剛性低下の要因としては部材自体や溶接箇所、締結部品の降伏、または締結部品のゆるみなどが挙げられるが、塑性の影響は既に考慮しているため、それだけでは実験結果との差異は説明できない。

一方、ねじゆるみ機構のアルゴリズムを導入した Model-C の結果を見ると、最大振幅は解析の方が少し小さいものの、波形自体は Model-B では特に差異が大きくなった 3 秒以降も良好に一致していることがわかる。また、Model-C では 11.4 秒時点で縦枠フレーム底面側の要素が降伏点に達したが、それまでには降伏した領域は無かったため、解析の前半に装置全体の剛性低下に寄与したのは、座面すべり回数依存によるねじゆるみの影響のみである。実験結果のように時間経過につれ振幅が大きくなっていく要因は、主にねじのゆるみの影響である可能性が高く、締結力低下率を適切に設定することで再現性が著しく向上することが判明した。

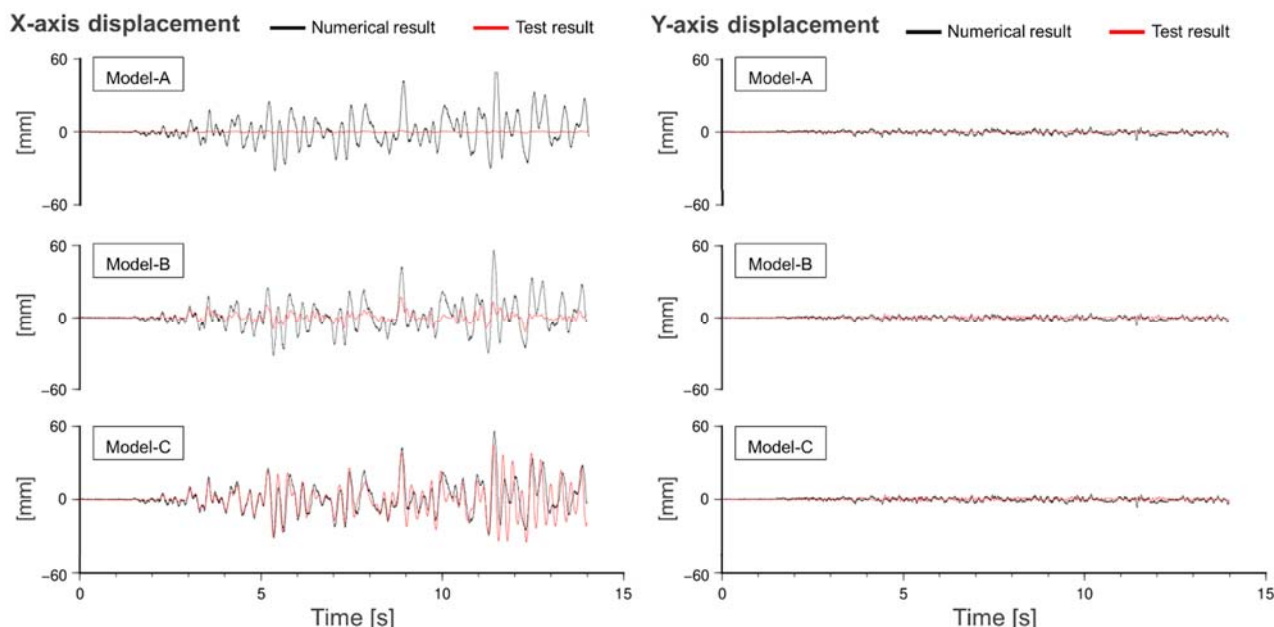


Fig. 5 Comparison between the numerical and experimental results

6. 結 言

ねじ締結を含む電子装置用ラックの地震時挙動を ASI-Gauss 法による数値解析によって再現することを試みた。実験結果とねじのモデル化の違いによる 3 つの解析結果を比較し、座面すべり回数依存によるねじゆるみアルゴリズムを考慮したモデルで最も実験と近い結果が得られることを確認した。ねじを含む解析対象では、ねじおよびそのゆるみを考慮することが重要であると考えられる。締結力低下率 a を任意に仮定する必要があることや、共振周波数が低下する実験結果の再現が課題ではあるが、本研究で開発した手法は、ねじ締結を有する多くの機械構造の地震時挙動の再現に有効となり得ることが示せた。

文 献

- (1) 山本晃, 賀勢晋司, “軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究—ゆるみ機構の解明—”, 精密機械, Vol.43, No.4 (1977), pp.470-475.
- (2) 泉聡志, 横山喬, 岩崎篤, 酒井信介, “ボルト締結体の締付けおよびゆるみ機構の三次元有限要素法解析”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.71, No.702 (2005), pp. 204-212.
- (3) Yamashita, T., Hori, M. and Kajiwara, K., “Petascale computation for earthquake engineering”, *Computing in Science and Engineering*, Vol.13, No.4 (2011), pp. 44-49.
- (4) 磯部大吾郎, チョウミョウリン, “飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析”, 日本建築学会構造系論文集, Vol.69, No.579 (2004), pp.39-46.