

VR 技術を活用した免震エキスパンションジョイントの挙動可視化 現実的課題を認識させるための支援装置としての VR 技術の可能性

Visualization of Behavior of Expansion Joints in Seismic Isolated Buildings by Using VR Technology

The potential of VR technology as an assistive device to make people aware of real problems

○満田 衛資*1, 中西 由衣*2
Eisuke Mitsuda*1, Yui Nakanishi*2

*1 京都工芸繊維大学 デザイン・建築学系 教授 工博

Professor, Faculty of Design and Architecture, Kyoto Institute of Technology, Dr. Eng.

*2 三重県庁 (京都工芸繊維大学卒業生)

Mie Prefectural Office (Graduate, Kyoto Institute of Technology)

キーワード：VR; 免震建物; エキスパンションジョイント; レジリエンス; 挙動可視化;
Keywords: VR; seismic isolated building; expansion joint; resilience; visualization of behavior.

1. はじめに

日本は世界有数の地震国であり、耐震技術においても世界的に見て高いレベルにある。耐震性能が高い建物のニーズは従来から多くあるが、特に 1995 年の兵庫県南部地震以後のさまざまな災害を経験することで、地震に対しては、構造躯体が耐え人命を守るだけでなく、大地震後も建物としての機能を維持し、あるいは短期間で復旧し、事業や日常生活を継続する能力を意味するレジリエンスもまた建物に要求される性能指標の一つとなってきた。そうした観点で言えば、免震建築物は最もその期待に応える建築物であることに異論はないだろう。

その一方で、免震建築物では、その特性上、免震された建築物と地盤との間には地震時に非常に大きな相対水平変位が生じる。その大きな相対変位に対して床・壁・天井など建築物各部の機能を保持するためには、その変位に追随・吸収できるエキスパンションジョイント(以下 Exp.J)が必要になる。免震 Exp.J に求められる重要な機能には、「地震時の強制変位に損傷せず追随し、地震後もその部位の機能を保持できること」と、「作動中に周辺にいる人に危害を加えないこと」の 2 点がある¹⁾。2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震において、免震建築物はその効果を十分に発揮し、建物の主要構造体及び、天井部材等の

建築仕上材の損傷は皆無であったが、免震 Exp.J の損傷が多数発生した。地震後に日本免震構造協会に設けられた応答建築物調査委員会で行われた調査では、調査建物の約 30%において免震 Exp.J の一部に損傷が生じており、震度の大きかった東北地方だけでなく、免震層の変位が小さかった関東地方の震度 4 以下の地域でも、多くの免震 Exp.J の損傷が確認された¹⁾。2016 年の熊本地震においても、免震建物はその性能を十分に発揮したものの、Exp.J の損傷が確認されている³⁾。免震 Exp.J の損傷には、製品自体の機能上の問題をはじめ、設置状況の問題、維持管理の問題など様々な要因が存在する。免震 Exp.J は動く製品でありながら、建物に設置した後は稼働試験を行うことが困難であり、実際の挙動をイメージしづらいこともその要因の一つであろう。仮に現場にて設計図面内の矛盾や施工ミス等が存在していたとしても、直感が働かないため、その問題点が見逃されやすい。竣工後に設置されたものとの接触による被害など、利用者に起因するような場合であっても、利用者の無知を責めることは作り手として正しい態度ではないだろう。

本報告は、そのような問題を少しでも減らすべく、VR 技術を用いて免震 Exp.J の地震時挙動を可視化することにより、設計者・製作者・施工者だけでなく建物の管理者や利用者に免震 Exp.J の挙動についてより理解を深めてもらい、免震 Exp.J の正しい設置や使用を促し、防災や安全に貢献しようという意図をもって書かれたものである。

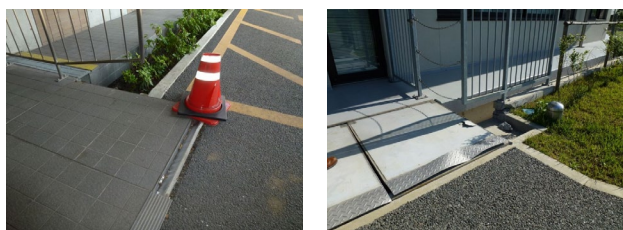


Fig 1. Damage to Exp.J in The 2016 Kumamoto Earthquake³⁾

2. 免震 Exp.J に関する現実的課題

2.1. 表示の不明瞭さ

免震建築物においては、「出入口その他の見やすい場所に、免震建築物であることその他必要な事項を表示する

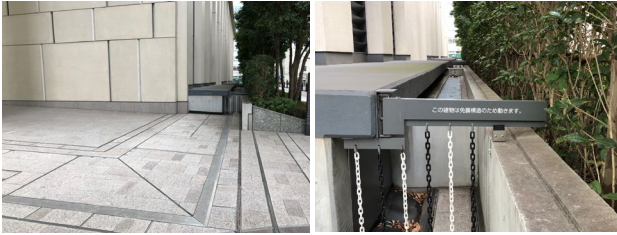


Fig 2. examples of hard to find notes as an isolated building

こと」という規定が存在する²⁾。しかしながら、実態としては、積極的にその表示がなされているとは思えない事例も目にすることが多い。

2.2.関与しづらい構造設計者

免震建物の構造設計者は、免震装置の配置計画や時刻歴応答解析の実施、大臣認定取得のための性能評価など、通常建物よりも難易度の高い作業をこなしている。その中で Exp.J 部は認定を受けた既製品を用いることも多く、構造設計者は変形量が許容値以内にあることについて確認は行うが、その周辺が具体的にどう利用されるのか、途中で想定との違いが生じていないか、躯体完了と共に現場を離れることの多い構造設計者が竣工間際まで追い続けるのは難しい。意匠設計者や施工者の意識改革も重要である。

2.3.地震が起こるまでわからない

免震 Exp.J の挙動は製品レベルでは試験を行い確認することもできる。自社製品の安全性アピールのために動画の公開も行っているメーカーもあり⁴⁾、勤勉な設計者であればその挙動を目にしたこともあるであろう。しかしながら、想定外の不陸による破損や、可動範囲内に置かれてしまった物の物損など、実存としての建物は理想状態にはないことの方が多く、地震が起こるまでは、何が起こるかわからない状態にある。

3. 免震 Exp.J の挙動の立式

免震建物の近くの地面に固定した視点場を設け、地震時の免震建物を観察すると、建物は視点場に向かい近づくと離れるを繰り返すように挙動する。その場合、周辺地盤とフラットに連続する場合に用いられる「せり上がり式」のエクステンション床の場合、建物が離れていく場合でも床が落ちることの無いようにクリアランス設計されているため水平に動くのみだが、視点場に近づいてくる場合は、ある範囲を超えると床がせり上がり始める。ここでは、当初フラットであった床面が、視点場に近づくとつれ、どのような「せり上がり角度」 θ を生じるか、 θ と建物1階床変位 x との関係を数式的に表現することで、床面の挙動の表現を試みた。本稿では、都市部の免震建物でよく利用されている、「先端カバー付き1方向スライド式のせり上がり式 Exp.J」のモデル化および立式について紹介する。

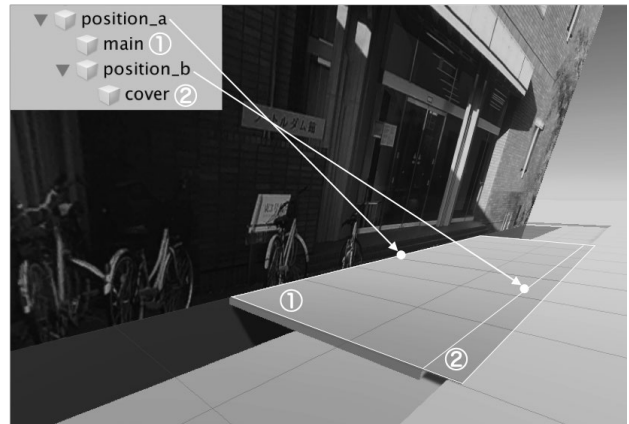


Fig 3. models in Unity ①:Main body of Exp.J ②:Tip Cover

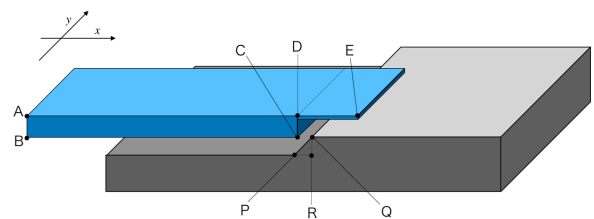


Fig 4. Illustration of the model of Exp.J

3.1 先端カバー付せり上がり式 Exp.J の挙動

先端カバー付せり上がり式床の Exp.J の挙動は、建物の地面に対する相対変位 x の値によって、以下の5パターンに分類される。なお本稿では Fig.3 における①を Exp.J 本体、②を先端カバーと呼ぶこととする。また同図の矢印の先端にあるライン (Fig.4 における点 A および D を通る y 方向の直線) がヒンジを有しているものとする。Exp.J 本体の建物側はその点 A を通るヒンジラインにより建物に支持され他は地面と接触している位置において支持されているものとし、先端カバーは点 D を通るヒンジラインにおいて Exp.J 本体に支持され他端は接している地面により支持されているものとする。 x とは、基礎を固定した場合の免震層で支持された1階床レベルにおける建物の水平変位である。

(i) $-l_3 \leq x \leq l_1$ の範囲

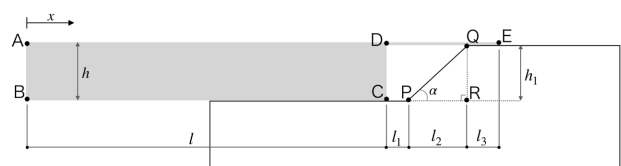


Fig 5. description of Exp.J in case (i)

Fig.5 に示した A 点および B 点の位置を $x=0$ とする。この (i) の範囲においては、建物の移動方向によらず、Exp.J 本体と先端カバーともに横方向にスライドするのみである。

(ii) $-\left(\frac{l_2}{\cos\alpha} + l_3 < x < -l_3\right)$ の範囲

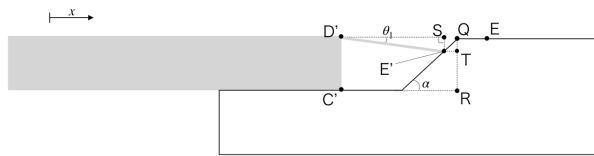


Fig.6 description of Exp.J in case (ii)

これは先端カバーの先端が斜面上を動く場合で Exp.J 本体は横にスライドする。

$$\sin\theta_1 = \frac{SE'}{D'E'} = \frac{h - h_1 + (x - l_3)\sin\alpha}{l_1 + l_2 + l_3} = \frac{h - h_1 + (x - l_3)\frac{h_1}{\sqrt{l_2^2 + h_1^2}}}{l_1 + l_2 + l_3} \quad (1)$$

として先端カバーの垂れ角 θ_1 が求められる。

(iii) $x \leq -\left(\frac{l_2}{\cos\alpha} + l_3\right)$ の範囲

これは先端パネルの先端が Exp.J 本体底面と同じレベルに着床している状態で、本体と先端カバー双方ともに横にスライドするのみである。

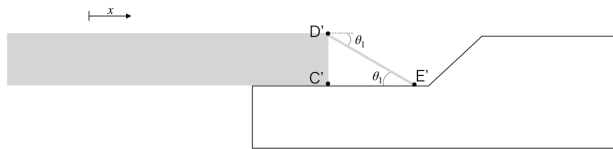


Fig.7 description of Exp.J in case (iii)

(iv) $l_1 \leq x \leq \left(l_1 + \frac{l_2}{\cos\alpha}\right)$ の範囲

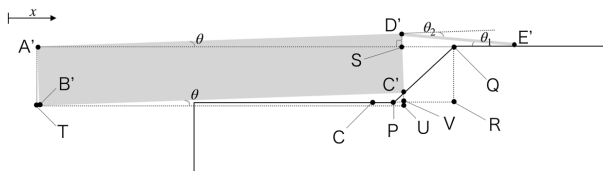


Fig.8 description of Exp.J in case (iv)

これは Exp.J 本体の先端が斜面上を動く場合で、この時の Exp.J 本体は水平ではなく移動量 x に応じた角度 $\theta(x)$ を生じさせながらせり上がり、先端カバーにも Exp.J 天端面から垂れ角度 $\theta_2(x)$ が生じる。Fig.5 における点 A から C に向かうベクトルを \mathbf{d} とすると、Fig.8 の点 A' から C' に向かうベクトルは回転行列 $\mathbf{R}(\theta)$ を用いて $\mathbf{R}\mathbf{d}$ となる。Fig.5 の B 点を原点とする座標系において、C' が斜面上にあるという幾何学的な条件から、

$$\begin{pmatrix} x \\ h \end{pmatrix} + \mathbf{R} \begin{pmatrix} l \\ -h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l + l_1 \\ 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} \quad (2)$$

が導かれる。

一般に Exp.J 本体は l に対する h が小さいため、 θ は十

分小さい範囲にあり、 $\cos\theta = 1, \sin\theta = \theta$ の近似を用いると

$$\theta = \frac{\sin\alpha}{l} \frac{x - l_1}{\left(\cos\alpha - \frac{h}{l}\sin\alpha\right)} \quad (3)$$

として θ を x の関数として記述できる。

また、 $D'E'\sin\theta_1 = l\sin\theta$ から θ_1 が求まり、 $\theta_2 = \theta + \theta_1$ が求まる。次の領域 (v) との連続性を重視したいのであれば、 $C'=Q$ となる状態と $C'=Q$ となる状態の斜面両端の 2 か所についてのみ θ を求め、 x の変化に応じて θ を線形近似することでも、Exp.J の挙動表現としては問題ない精度が得られる。

(v) $\left(l_1 + \frac{l_2}{\cos\alpha}\right) \leq x$ の範囲

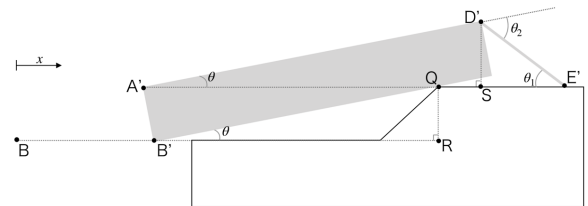


Fig.9 description of Exp.J in case (v)

この範囲では、Exp.J 床底面の一部が常に斜面の頂部 Q に触れながらスライドすることになる。この範囲では、Exp.J 床底面の先端が斜面上を動くため、Exp.J 本体は (iv) の状態よりもさらにせり上がり上がる。 $\angle A'QB' = \theta$ であるから、直角三角形 $A'QB'$ において、

$$\sin\theta = \frac{h}{l + l_1 + l_2 - x} \quad (4)$$

として θ が求まる。また (iv) と同様に θ_2 も求まる。

以上、先端カバー付きせり上がり式の Exp.J の動き方が異なる (i) ~ (v) の状態を、建物の変位量 x に応じて全て記述することができた。

4. ゲームエンジンをい簡便に VR 化する

前章で示した内容は、その位置により異なる挙動を示す Exp.J について、建物 1 階床の変位 x に応じてその内容を示したものである。

ところで、本報告の意図は、可能な限り簡便に、(精緻さに拘らない) ある程度のリアリティをもって、免震 Exp.J の挙動を表現することにある。本章では、考慮すべき代表変位 x の設定の方法や、複雑な手法を用いずに、建物利用者が自らの関係する建物であることを認識できるような方法を提案してみたい。

4.1. 地震時応答変位の導出

今ここで考えているのは、マンション住人やオフィスの利用者等の一般の人々にとっての免震 Exp.J の挙動である

ため、建物上部躯体の応答等の複雑なことについては考えない。上部躯体は剛体的に挙動するものとするれば、1質点系として考えれば十分である。

建物データとして、建物質量や固有周期（剛性）などの正確な情報が手に入ればそれを用いればよいし、それが難しければ、建物質量を延床面積から類推し、免震層のみが主たる変形モードとなる1次固有周期を3秒と設定して剛性を逆算する等できれば、Newmarkの β 法等を用いて1質点系の時刻歴応答は容易に求めることができる。

なお、建物と地面が完全に絶縁され、建物は全く動かずに地面だけが動くような理想的な免震状態を実現できているとすれば、わざわざ時刻歴応答解析など実行せずとも入力地動変位データをそのまま用いるでも、ある程度のリアリティのある表現は可能であることを付け加えておく。

4.2 ゲームエンジンを用いた挙動表現

ゲームエンジン Unity 内で建物を Cube で剛体表現し、前節であらかじめ求めておいた時刻歴応答変位の値を読み込めば、Cube をその時刻歴の値のまま動かすことが出来る。前節において、 x 方向だけでなく y 方向の挙動も求めておけば、より複雑な挙動も容易に表現できる。

マンション住人等が自らの居住する建物外観を撮影し、Unity 上の Cube にそれら写真を貼り付けるだけで、複雑な立体モデルを作成するような手間をかけずに、自らの居住する建物に関する事象であると認識できるようになる。

Unity 等に代表されるゲームエンジンは、即座に VR 環境を提供してくれるため、ヘッドマウントディスプレイ（以下 HMD）を装着することで、即座に VR 空間内にて挙動を体験することができるようになる。Cube は直方体以外に加工することも可能で、外形に特徴を出してリアリティを高めることも可能である。3D データを用いても良い。

Fig.10 は、筆者の所属する大学内に実存する東3号館と呼ばれる建物（非免震建物）の外観写真を Unity 上の Cube に貼り付けたものである。仮にこの建物が免震建物であったならば、という架空の例ではあるが、実際に教員や学生に HMD を装着してもらって、細かい凹凸のない写真を貼り付けただけであるにも関わらず、即座に東3号館であることは認知されたので、精緻な CG 作成や点群データの利用等まで行わずとも十分に効果的であることがわかる。



Fig.10 paste the photo into the cube in Unity

4.3 床の挙動のみをゲームエンジンに計算させる

Cube に対し、3章で示した①Exp.J 本体をヒンジ接続し、さらにその先端に②先端カバーをヒンジ接続する。ゲームエンジンは重力の作用した物理演算を行うことも可能だが、ここでは幾何学計算のみとする。これにより、剛体 Cube と Exp.J の接続ヒンジは同じ $x(t)$ で動くこととなる。Unity 内のオブジェクトである①Exp.J 本体、と②先端カバーは、位置と角度で表現可能なため、 $x(t)$ に応じて角度 $\theta(t)$ および $\theta_2(t)$ の関係式を Unity 内に script として書き込むことで、物理演算無しに床の挙動を表現することができる。また、例えば長周期地震動と直下型地震動のように異なる地震動に対する建物時刻歴変位 $x(t)$ だけをあらかじめ求めておけば、そうした異なる地震動が作用した場合の免震 Exp.J の挙動をそれぞれに容易に Unity 内で自動計算させることが可能となっている。Fig.11 では免震 Exp.J が Unity 内にてせりあがった状態（3章における（v）の状態）として表現されていることが確認できる。

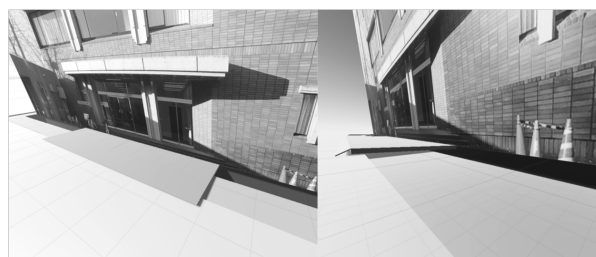


Fig.11 the behavior of Exp.J in case (v)

5. まとめ

一般の人々のみならず設計や施工に関わる者も決して十分に理解できているとは言えない免震 Exp.J の地震時挙動についてゲームエンジンを用いて簡便に VR 化する手法を提示した。地震動を簡便な手法で別途に容易しておくことで、Unity 内では複雑な物理演算を行わせる必要がなくなり、スムーズな動きを VR 体験することができる。本稿はせり上がり式の床の Exp.J による例示であるが、本手法はスライド・ヒンジ式の壁、スライド式天井など、さまざまな Exp.J にも適用可能であり、それらのセットを用意しておくことで、より幅広く応用可能となる。

[参考文献]

- 1) 一般社団法人日本免震構造協会編：免震エキスパンションジョイントガイドライン，2013.4
- 2) 平成12年建設省告示第2009号第4の五
- 3) 高山峯夫：免震のすすめ 第6回「熊本地震における免震構造の効果」，NTT ファシリティーズ総研 SEIN WEB，<https://www.sein21.jp/NewSeinWeb/TechnicalContents/Takayama/Takayama0106.aspx>（参照 2020.10.2）
- 4) 株式会社 KANESO：性能確認試験動画，http://www.kaneso.co.jp/exjoint/mx/mx_performance-test.htm（参照 2020.10.2）