

長周期地震動に伴う建築物の隣棟間衝突・崩壊解析

Impact and Collapse Analysis of Neighboring Buildings Subjected Under Long-Period Seismic Excitation

新垣 裕太¹⁾, 久永 哲也²⁾, 勝 拓也³⁾, レティタイタン⁴⁾, 磯部 大吾郎⁵⁾

Yuta Arakaki, Tetsuya Hisanaga, Takuya Katsu, Le Thi Thai Thanh and Daigoro Isobe

- 1) 筑波大学 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, e0611299@esys.tsukuba.ac.jp)
- 2) 九州電力株式会社
- 3) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, takuya_katsu@esys.tsukuba.ac.jp)
- 4) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, e0712356@esys.tsukuba.ac.jp)
- 5) 博(工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Collapse of neighboring buildings due to collision caused by long-period seismic excitation were observed in the Mexico earthquake, which occurred in 1985. In this study, we carried out some seismic collapse analyses using ASI-Gauss technique to investigate the collision behaviors of neighboring buildings. It is confirmed that the collision of buildings may well be generated by the difference of natural periods between neighboring buildings.

Key Words: Long-period seismic excitation, Impact, Collapse analysis, ASI-Gauss technique

1. はじめに

1985年に起きたメキシコ地震では、震源地から400kmも離れたメキシコシティ(図1参照)において、特定の固有周期を持つ高層建築物が長周期地震動により多数崩壊した[1]。崩壊した建築物の中には、図2に示すような3棟がエクステンション・ジョイントにより連結されていた Nuevo Leon 棟が含まれる。この棟は、地震により図3のように1棟以外が完全に崩壊してしまった。これは、建築構造の耐力低下や地盤の不同沈下に伴う固有周期の変化、軟弱地盤が引き起こす地震波の伝播時間差などにより、隣接する建物が異なる揺れ方をした上、長周期地震動に伴う共振現象が重なり、隣接する建物同士の衝突が生じたからと考えられている。このように、固有周期の長い高層建築物は、長周期地震動下では長時間に渡り大きく揺れるため、棟間衝突が起こる危険性が出てくる。特に都市部に高層建築物が近接している箇所が多数存在する我が国でも、これは憂々しき問題である。

本研究では、長周期地震動に伴う隣棟間衝突と崩壊の可能性を検証することを目的とする。そこで、ASI-Gauss法[2]を用いた地震崩壊解析システムに、内分ベクトル型接触アルゴリズム[3]と接触解除アルゴリズムを導入し、メキシコ地震により崩壊した建築物の隣棟間衝突現象を再現する。まず始めに、高さの異なる2種類の簡易モデルに対し、固有周期の相違による隣棟間衝突の可能性を探る。次に、図2の3連棟を模擬したモデルを作成し、北棟のみ部材の剛性値を下げることで固有周期を変え、解析を行った。



図1 メキシコシティと震源地の位置関係

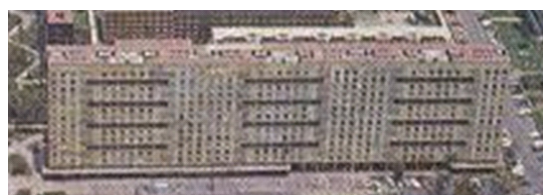


図2 地震前の Nuevo Leon 棟



図3 崩壊後の Nuevo Leon 棟 (奥は南棟)
(写真: Marco Antonio Cruz)

2. 解析手法

解析には、大規模骨組構造の構造解析において最小限のコストで計算可能であるASI-Gauss法を基に、独自開発した有限要素解析コードを使用した。時間積分法にはNewmarkの β 法[4]を用いた。本節では、破断および接触・接触解除アルゴリズムについて説明する。

2.1 破断アルゴリズム

部材破断の判定条件としては、部材を構成する各要素の曲率、引張軸ひずみおよびせん断ひずみによる次式を用いた。

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

ここで、 $\kappa_x, \kappa_y, \varepsilon_z, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ は要素における x 軸・ y 軸回りの曲率、引張軸ひずみ、 x 軸・ y 軸方向のせん断ひずみであり、添字0は破断臨界値であることを示す。破断臨界値には、平島らによる実験[5]と濱田らの実験[6]により得られたものを用いた。 ε_{z0} には、SN490Bの物性値[7]を使用した。

2.2 接触・接触解除アルゴリズム

接触判定には内分ベクトル型接触アルゴリズム[3]を用い、接近する2本の要素の節点間距離および節点の幾何学的位置関係により判定を行う。接触と判定された要素同士については節点間に計4つのギャップ要素（接合要素）を結合しそれらを拘束した。この過程により、部材が衝突する際の運動エネルギーの伝達を表現することができる。ギャップ要素の物性値には、モデルに使用する他部材の値を用いている。接触解除判定には、ギャップ要素によって拘束している4つの節点の接触開始から現時刻までの変位量を用い、次式に従って相当変位 $|u_x|, |u_y|, |u_z|$ を計算する。

$$|u_x| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(X_i + \Delta X_i)^2} \quad (2a)$$

$$|u_y| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(Y_i + \Delta Y_i)^2} \quad (2b)$$

$$|u_z| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(Z_i + \Delta Z_i)^2} \quad (2c)$$

X_i, Y_i, Z_i はそれぞれ、接触開始から現時刻までの X, Y, Z 方向の変位、 Δ は増分を表す。 $|u_x|, |u_y|, |u_z|$ のうち、いずれか1つがその最大値のある割合以下になったとき、接触を解除する。この割合を接触解除判定比と定義する。また、接触解除の概念図を図4に示す。接触要素または被接触要素が破断した場合には、それ以上拘束する必要がないものと考え、拘束を解除する処理を行う。

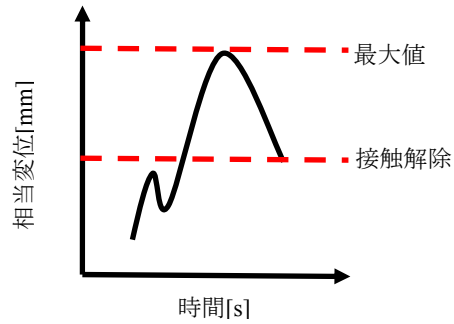


図4 接触解除の概念図

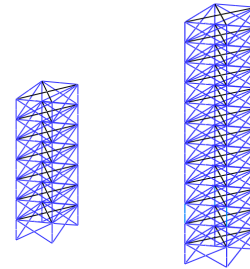


図5 簡易モデル

表1 部材の断面形状

	柱(1~5階)	柱(6~10階)	柱(11~12階)
部材断面	□330×330 ×10	□280×280×9	□230×230×7
	梁	床スラブ	
部材断面	H292×730.0 ×16.2×11.6	□230×230×7	

表2 部材の物性値

	柱	梁	床 スラブ	壁 ブレース
降伏応力[MPa]	3.25× 10 ²	3.25× 10 ²	3.25× 10 ²	2.35×10 ²
弾性係数[GPa]	2.06× 10 ⁵	2.06× 10 ⁵	2.06× 10 ⁵	2.06×10 ⁵
密度[kg/mm ³]	7.90× 10 ⁻⁶	7.90× 10 ⁻⁶	7.90× 10 ⁻⁶	7.90×10 ⁻⁶
ポアソン比	0.30	0.30	0.30	0.30

3. 簡易モデルによる隣棟間衝突解析

本節では、図5に示すような固有周期の異なる2種類の簡易モデルを用い、隣棟間衝突の可能性を検証する。まず2棟の12層1スパンモデルを30[cm]間隔で隣接させ、固有周期が同一である場合について、次に、7層1スパンモデルと12層1スパンモデルを30[cm]間隔で隣接させ、固有周期が異なる場合について解析を行う。

3.1 簡易モデルの構成

簡易モデルの1層当りの階高は3.46[m]、1スパンの幅6.3[m]、奥行き12.4[m]である。部材の断面形状を表1に、部材の物性値を表2に示す。壁ブレースの部材は、正方形

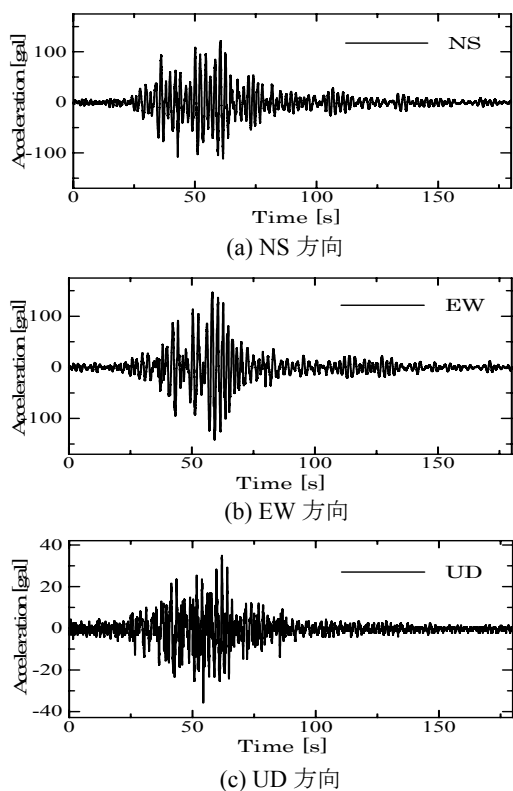


図6 入力地震波

断面と仮定した鋼材の断面積を、コンクリート壁の重量と適合させ設定した。また、床荷重は $450[\text{kg}/\text{m}^2]$ と設定した。

3.2 解析条件

入力地震波には、メキシコシティで観測されたSCT波に対し、地震波の震央からNuevo Leon棟への到来方向を考慮した波形（NS最大 $122.1[\text{gal}]$ 、EW最大 $147.4[\text{gal}]$ 、UD最大 $35.8[\text{gal}]$ ）を使用した。入力地震波の3軸方向それぞれの加速度時刻歴を図6に示す。これらの波形を全支持点に対し同時に入力した。接触判定に用いる部材幅は、梁・床・壁を $30[\text{cm}]$ 、柱を $40[\text{cm}]$ とした。接触解除条件として、接触解除判定比を50%とし、接触解除後すぐに接触してしまうことを回避するための接触回避時間を $300[\text{ms}]$ とした。また、解析におけるCG法の収束ノルムは 1.0×10^{-6} 、時間増分は $1[\text{ms}]$ 、総解析ステップ数は $183501[\text{step}]$ である。破断臨界値は曲率 κ_0 : 3.333×10^{-4} 、引張り軸ひずみ ε_{z0} : 0.17 、せん断ひずみ γ_0 : 2.600×10^{-3} として(1)式に用いた。

3.3 解析結果

隣接する2棟とも12層モデルの場合、すなわち固有周期が同一の場合、棟間距離が $30[\text{cm}]$ と十分に近接していても、衝突は起こらず崩壊には至らなかった。しかし、一方を7層モデルとした場合、すなわち固有周期が異なるモデルを隣接させた場合、衝突が生じ2棟とも崩壊に至った。後者の場合の崩壊挙動を図7に示す。

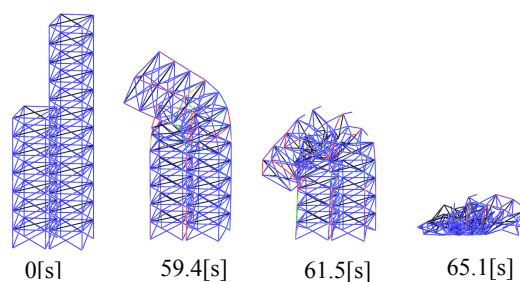


図7 簡易モデルの隣棟間衝突解析結果

以上の結果より、隣接する建物の固有周期が異なる場合、棟間距離を十分に取らないと隣棟間衝突が起こる可能性があり、場合によっては崩壊が引き起こされてしまうことが確認された。

4. 3連棟モデルによる隣棟間衝突解析

本節では、メキシコ地震の際に倒壊したNuevo Leon棟を模擬した3連棟モデルを作成し、その棟間衝突による崩壊現象を再現することを試みた。まず1棟のみの場合について解析を行い、地震動のみによっては倒壊しない設計であることを確認する。次に、3連棟モデルを設計値通りに $10[\text{cm}]$ 間隔で隣接させ、北棟のみ固有周期を変更し、検証を行う。

4.1 3連棟モデルの構成

1985年当時のメキシコにおける設計基準を参考にし、ベースシア係数を 0.06 、床荷重を $400[\text{kg}/\text{m}^2]$ 、軸力比を 0.5 と高めの値に設定してNuevo Leon棟モデルを作成した。表1、表2と同様に部材性状としてはSM490（柱）、SS400（はり）のものを使用し、レンガ壁は鋼材の 10^3 倍の剛性を有するトラス構造、床の剛性は鋼材の 100 倍とした。また、減衰率は5%とした。1棟当りの幅は $53.1[\text{m}]$ 、奥行き $12.4[\text{m}]$ 、高さ $42.02[\text{m}]$ である。1棟モデルを図8に示し、設計値 $10[\text{cm}]$ の棟間距離で隣接させた3連棟モデルを図9に示す。調査事例より3連棟間で最大25%程度の固有周期の相違が確認されたため、北棟のみ長辺方向の固有周期が25%増しになるように柱の強度を設定した。各々の棟の固有周期を表3に示す。

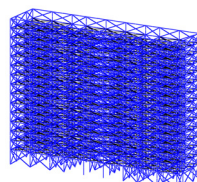


図8 1棟モデル

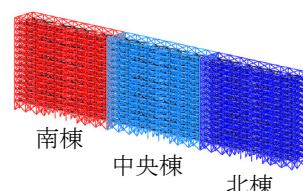


図9 3連棟モデル

表3 各棟の固有周期

	NS(長辺)方向	EW(短辺)方向
北棟	1.50[s]	1.72[s]
中央棟	1.20[s]	1.65[s]
南棟	1.20[s]	1.65[s]

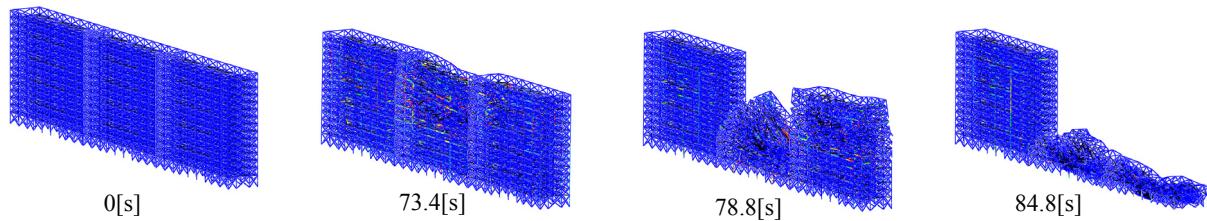


図 10-3 連棟モデルの隣棟間衝突解析結果

4.2 解析条件

入力地震波には第3節と同様のものを用い、全支持点に対し同時に入力した。また、接触判定に用いられる部材の幅についても前節と同様のものを用いた。一方、棟間では比較的穏やかな接触が長く続く傾向があり、接触が解除されにくい状況となったため、接触解除条件としては接触解除判定比を95%とし、接触解除後の接触回避時間を500[ms]とした。CG法の収束ノルムは 1.0×10^{-6} 、時間増分は1[ms]、総解析ステップ数は90000[step]である。Nuevo Leon棟はRC造であったため、せん断ひずみの破断臨界値は $\gamma_0: 3.380 \times 10^{-4}$ とした。

4.3 解析結果

1棟のみの場合、破断箇所は見られたが崩壊には至らなかった。しかし、3棟が隣接し、北棟のみ固有周期が異なる場合には、40秒過ぎから2.2秒ほどの周期の振れを伴いながら大きな揺れが生じ、主に北棟と中央棟が衝突し合う様子が観察された後、70秒付近で中央棟が倒壊し始め、次いで北棟が倒壊した(図10参照)。崩壊後の様子と図3の写真と比較すると、ほぼ良好に一致していることが確認できる。

5. おわりに

本研究では、2種類の解析を行った。簡易モデルによる解析では、高さが異なる2棟間で隣棟間衝突が起こり、2棟とも崩壊した。また、3連棟モデルの解析では、北棟のみの固有周期が変化しただけで隣棟間衝突が起こり、南棟以外の棟が完全崩壊した。以上の結果より、隣棟間衝突とそれにより引き起こされる崩壊の危険性が示された。今後は、高層ビル間の適正な棟間距離に対する指標を定める上で、数々の定量的検証を行う必要があると考えている。

謝辞

本研究を遂行するに当たり、足利工業大学の太田外氣晴教授、日本放送協会の井上智広氏、(株)橋梁コンサルタントの松枝富士雄氏にはメキシコ地震に関する情報収集、計算機環境の提供、入力地震波の算定に関して多大な協力をしていただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば 和泉 正哲 他：1985年メキシコ地震に関する調査研究、文部省科学研究費(No.60020049)成果報告書、(1986).
- 2) 磯部大吾郎, チョウ ミヨウ 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, 第579号, (2004), pp. 39-46.
- 3) 久永 哲也, 磯部大吾郎：ASI-Gauss法を用いた衝突崩壊解析コードにおける破断・接触アルゴリズムの検討、日本建築学会2008年度大会(中国)学術講演梗概集B-1, (2008), pp. 391-392.
- 4) K. J. Bathe: Finite Element Procedures, Prentice Hall, (1996).
- 5) 平島 岳夫 他：高温時における高力ボルトの剪断変形状に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集, 第 621 号, (2007), pp. 175-180.
- 6) 濱田 直之 他：高力ボルト継ぎ手の耐火性に関する実験的研究(高力ボルト梁継ぎ手の高温時における純曲げ実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, (2006), pp. 105-110.
- 7) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針, (2001).