

隣接建築物の適切な棟間距離算定のための棟間衝突解析

Seismic Pounding Analysis for Estimating Appropriate Clearance between Adjacent Buildings

○非 高寺 健太 (筑波大院)
Kenta TAKATERA, Graduate School, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

正 磯部 大吾郎 (筑波大)
Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba,
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Key Words: Seismic Pounding, Natural Period, ASI-Gauss Technique

1. 緒言

1985年にメキシコ地震が発生し、震源から400kmも離れたメキシコシティにおいて、3棟が隣立した集合住宅のNuevo Leon棟が棟間衝突を起こし倒壊した。これについて、先行研究[1]では高さや形状が同一の3棟が隣接する建築物について、過去の地震で被災したことにより耐力が低下し、そのうち1棟の固有周期が変化すると想定し棟間衝突解析が行われた。そして、固有周期が異なる建築物間では棟間距離を十分に取らなければ棟間衝突が起こる可能性があり、場合によっては倒壊現象を引き起こされてしまうことが示された。また、高さの異なる建築物の場合も固有周期の差異により異なる揺れ方をするため、棟間距離が短い建築物同士では棟間衝突を起こしてしまう恐れがある。2011年の東北地方太平洋沖地震では、東京都内において高層建築物が大きく揺れた例が数多く報告されており、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日本にとって、これは大きな問題となる。

ここで問題となる棟間距離の算定方法について、笠井ら[2]はSPD法(Spectral Difference Method)を提案している。これは、異なる揺れ方をする建築物の位相差を考慮した棟間距離の算出方法であり、対象とする建築物の固有周期や減衰比、地震波のスペクトル波形などから必要な棟間距離を求めることができる。この方法は位相差を考慮できるため、近い固有周期を持つ隣接建築物では棟間距離を短くすることができるという利点がある一方、想定する地震波により適切な棟間距離が変化してしまい、そのため地震波の選択が難しいという欠点がある。

本研究では、一般的に建築物の高さの違いにより固有周期が異なることに着目し、想定する地震波によらない棟間距離を定義し棟間衝突解析を行うことで、棟間衝突の危険性を示すとともに適切な棟間距離の評価を行った。また、棟間距離の算定には、想定する地震波によらない弾性限界の変位量、塑性限界の変位量という2つの指標を提案し用いる。さらに、解析後に各モデルの全柱・梁の要素数に対する塑性化した要素数の割合を求め、これにより棟間距離や入力地震波の大きさの違いによる損傷度合の変化を調べ、考察を行った。

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が可能なASI-Gauss法[3]に、以下に示す破断および接触・接触解除アルゴリズムを導入した地震崩壊解析コードを用いた。

まず、部材の破断判定には部材を構成する各要素の曲率、せん断ひずみ、引張軸ひずみによる以下の条件を用いる。

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

ここで、 κ_x , κ_y , γ_{xz} , γ_{yz} , ε_z はそれぞれ各要素におけるx軸、y軸回りの曲率、x軸、y軸方向のせん断ひずみ、引張軸ひずみであり、添字0は破断臨界値を示す。本研究では、上記5種類の破断臨界値を各種実験結果[4][5]などを参考に与えた。

次に、接触判定には内分ベクトル型接触アルゴリズム[6]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。接触が判定された要素の組については、4つの節点を4本のギャップ要素を用いて結合する。この操作により、節点力がギャップ要素を通じて他要素の節点に伝わるようになるため、要素同士の接触を表現することが可能となる。また、ギャップ要素には通常の部材と同程度の剛性を持たせることとする。接触解除判定には、まずギャップ要素によって拘束させている4つの節点の、接触開始から当該ステップに至る全体座標系の相対変位値を用い、次式に従って相当変位 $|u_x|$, $|u_y|$, $|u_z|$ を計算する。

$$\begin{aligned} |u_x| &= \sum_{i=1}^4 \sqrt{(u_{xi} + \Delta u_{xi})^2}, |u_y| = \sum_{i=1}^4 \sqrt{(u_{yi} + \Delta u_{yi})^2}, \\ |u_z| &= \sum_{i=1}^4 \sqrt{(u_{zi} + \Delta u_{zi})^2} \end{aligned} \quad (2)$$

u_{xi} , u_{yi} , u_{zi} はそれぞれ、接触開始から当該ステップに至る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、接触解除後すぐに再接触してしまうことを回避するために接触回避時間を設ける。本研究では、接触解除判定比を95%、接触回避時間を200[ms]とした。

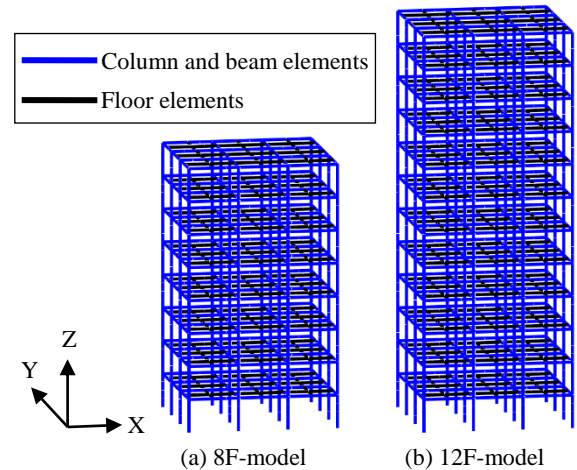


Fig.1 Numerical model

Table-1 No. of elements

	8F-model	12F-model
Total No. of elements	1,856	2,784
No. of column and beam elements	1,280	1,920

3. 解析モデル

本研究では、Fig.1 に示すような高さの異なる 2 種類のモデルを用いる。解析モデルはそれぞれ 8 層 3×3 スパン、12 層 3×3 スパンの鋼構造建築物とする。全高は 8F モデルが 32 [m]、12F モデルが 48 [m]であり、階高はどちらも 4 [m]、スパンは X 軸・Y 軸方向ともに 6×6×6 [m]としている。柱部材、梁部材には SS400 の鋼材を用い、弾性係数、降伏応力、ポアソン比、密度はそれぞれ、205 [GPa]、235 [MPa]、0.3、 7.85×10^{-6} [kg/mm³]とした。また、柱部材は角形鋼管とし、梁部材は H 形鋼とする。床については剛床を仮定し、固定荷重と積載荷重合わせて 800 [kgf/m²]を部材密度に換算し、床部材、梁部材に与えた。柱、梁の断面寸法は、ベースシア係数を設定した際の、建築物に必要とされる水平耐力を満たす断面を算出した結果を用いた[7]。ここで、ベースシア係数は 8F モデルを 0.232、12F モデルを 0.167 とした。また、各モデルの総要素数および床要素を除いた全柱・梁の要素数を Table-1 に示す。

4. 棟間距離の算定

本研究では棟間距離の算定のために、弾性限界の変位量、塑性限界の変位量という 2 つの指標を提案する。この指標は先述した SPD 法とは異なり、建築物の位相差は考慮できないが、地震波によらず一定の棟間距離を定義できるという利点がある。本節ではこの 2 つの指標について説明し、棟間距離の定義を行う。

弾性限界の変位量とは、建築物が単体では塑性化を起こさないにもかかわらず、衝突により塑性化が起こることを防ぐための指標である。本研究においては、前節でモデル化を行った建築物について、固有周期に合わせた sin 波を入力し解析することにより、建築物が共振するときの水平変位を算出した。さらに、入力する sin 波の最大振幅を変更し解析を行うことにより、建築物の弾性限界を調べ、そのときの最上階の最大水平変位の絶対値を弾性限界の変位量とした。

次に、塑性限界の変位量とは、建築物が単体でも塑性化を起こすが、許容される範囲内の被害である場合、衝突によりさらに被害が大きくなることを防ぐための指標である。ここで、国土交通省の建築構造設計基準の資料[8]によると、大地震動時においても、構造体および非構造部材に発生する損傷の程度を小さくするため、鉄骨造建築物の場合、層間変形角の最大値が 1/100 以下となるよう設計を行うとある。そのため、本研究ではこれを参考にし、層間変形角 1/100 に各モデルの全高を乗じることで算出される最上階の水平変位を塑性限界の変位量とした。

以上の条件で求めた各モデルにおける固有周期、弾性限界の変位量、塑性限界の変位量を Table-2 に示す。棟間衝突解析を行う際は、これらの数値をもとに棟間距離を設定する。このとき、各モデルの弾性限界の変位量を足し合わせた 350 [mm]を弾性限界距離、塑性限界の変位量を足し合わせた 800 [mm]を塑性限界距離、さらに、これら 2 つの距離を足し合わせた 1150 [mm]を弾塑性限界距離と定義する。

5. 2 棟隣立モデルの棟間衝突解析

本節では、8F、12F モデルを X 軸方向に並べた 2 棟隣立モデルについて棟間衝突解析を行うことにより、棟間衝突の危

Table-2 Natural period, elastic and plastic limit displacements of each model

	8F-model	12F-model
Natural period [s]	1.24	1.79
Elastic limit displacement [mm]	138	209
Plastic limit displacement [mm]	320	480

険性について考察する。地震波には、各モデルが弾性限界を超えないように調整された地震波、および弾性限界を超える地震波を用いる。そして、解析終了時における全柱・梁の要素数に対する塑性化した要素数の割合を求め、これを塑性化率として損傷度合を比較する。

5-1 解析条件

入力地震波には、2003 年十勝沖地震で観測された卓越周期が長く、最大加速度の大きい厚真波を用いる。厚真波の加速度波形を Fig.2 に示す。ここで、今回の解析で 2 棟を並べる EW 方向の卓越周期は 1.96 [s]である。また、各モデルが弾性限界を超えないように調整された地震波としては 13%厚真波を用い、弾性限界を超える地震波として厚真波原波を用いる。各入力地震波による解析をする際に設定した棟間距離を Table-3 に示す。入力地震波を 13%厚真波とした場合、建築物が塑性化を起こさない範囲で揺れることを想定しているため、前節で定義した弾性限界距離 350 [mm]を棟間距離として設定する。また、2 棟をそれ以上に近接させた場合を想定し、弾性限界距離より短い距離として棟間距離を 90 [mm]とした場合についても解析を行う。入力地震波を厚真波原波とした場合は、建築物が塑性化を伴い揺れることを想定しているため、前述の弾性限界距離に加え、塑性限界距離 800 [mm]を棟間距離として設定する。また、さらに安全側に見積もった場合として、これら 2 つの距離を足し合わせた弾塑性限界距離 1,150 [mm]を棟間距離として設定する。

5-2 解析結果

入力地震波を 13%厚真波とし棟間距離を 90 [mm]と設定した場合、棟間衝突が起き 8F、12F モデル双方に塑性化した要素が見られた。衝突後、55.0 [s]における棟間距離 90 [mm]の場合の解析結果を Fig.3 に示す。要素の色は次式に示す関数 f_y によって変化し、赤色に近いほど降伏が進んでいることを示す。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 M_x 、 M_y は要素における x、y 軸周りのモーメント、 N は軸力である。また、添え字 0 はその断面力の全断面塑性値を意味している。Fig.3 を見ると、衝突によって 8F モデルの 8F 梁要素に塑性化した要素が見られる。このとき、8F、12F モデルの塑性化率はそれぞれ、4.8%、1.2%となり、8F モデルの方が損傷度合が大きくなった。また、棟間距離を弾性限界距離 350 [mm]とした場合では棟間衝突が起きず、最上階での変位も単体解析と同じ結果となった。

次に、入力地震波を厚真波原波とした場合、棟間距離を弾性限界距離 350 [mm]、塑性限界距離 800 [mm]、弾塑性限界距離 1,150 [mm]とした全ての場合において棟間衝突が起きた。また、同じく全ての場合において 8F モデルの 8F 梁要素に破断が見られた。ここで、各モデルを単体で解析した場合、および各棟間距離を設定し棟間衝突解析をした場合の 8F、12F モデルの塑性化率および破断要素数を Table-4 に示す。これを見ると、8F モデル、12F モデルともに棟間距離が短くなるほど塑性化率が高くなっており、特に 8F モデルにおい

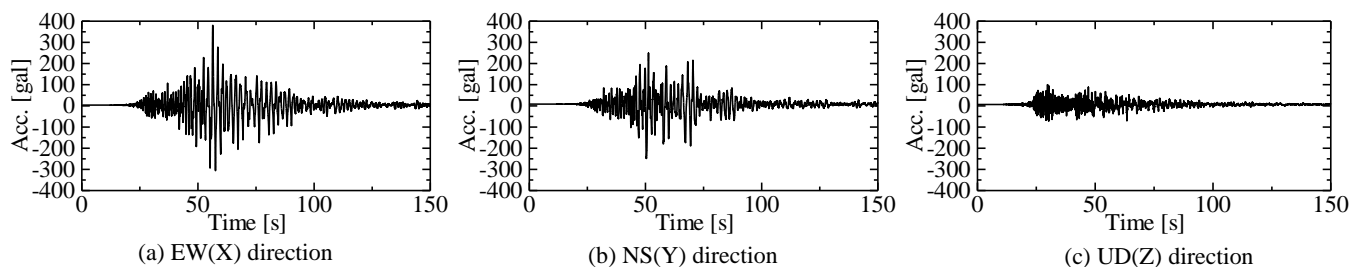


Fig.2 Input seismic wave (Atsuma wave)

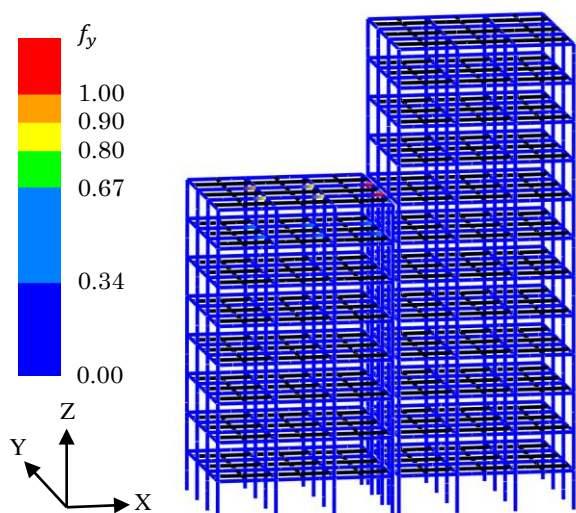


Fig.3 Numerical result at 55.0 [s]

Clearance: 90 [mm], Input: 13% Atsuma wave

ては塑性化率の上がり幅が大きくその傾向が強いことが分かる。また、要素の破断は 8F モデル最上階でのみ起きたが、これは衝突が起きた位置での部材の強度が 12F モデルに比べ 8F モデルの方が弱いことが原因であると考えられる。さらに、破断した要素数については棟間距離を長くした場合でもあまり変化がないため、最上階での損傷を抑えるためには別の対策が必要であると考えられる。

6. 結言

本研究では、地震波によらない棟間距離の算定方法を提案し、高さの異なる 2 棟隣立モデルを用いて棟間衝突解析を行った。解析結果より、単体では部材に塑性化が起きないような規模の地震が起きた場合、建築物が近接しているときには棟間衝突が起き、各建築物に損傷が見られるが、弾性限界距離を棟間距離として設けていれば、棟間衝突を回避できることを確認した。しかし、大規模な地震により塑性化を伴う揺れが起きた場合、この距離では棟間衝突が起き、建築物は破断を伴い大きく損傷してしまう。今回の解析では、衝突が起きた場合は棟間距離に関係なくほぼ一定の要素が破断しているため、衝突が起こる位置に緩衝材を設けるなど別の対策が必要であると考えられる。

また、棟間距離による各モデルの損傷度合の比較をするため塑性化率を求めたところ、入力地震波を 13% 厚真波とした場合、棟間衝突が起きた際には、12F モデルに比べ、高さの低い 8F モデルの塑性化率が高くなった。さらに、入力地震波を厚真波原波とした場合、棟間距離が短いほど塑性化率が大きくなり、その傾向は 8F モデルで強く現れた。また、要素の破断も 8F モデルのみに起きており、このことから高さの異なる建築物による棟間衝突が起きた場合、高さの低い建

Table-3 Fixed clearances

Input wave	Clearance [mm]
13% Atsuma wave	90, 350
100% Atsuma wave	350, 800, 1150

Table-4 Plasticity ratio and number of fractured elements in analyses with single model and two adjacent models

	8F-model		12F-model	
	Plasticity ratio [%]	No. of fractured elements	Plasticity ratio [%]	No. of fractured elements
Single model	30.8	0	40.5	0
Elasto-plastic limit clearance	38.6	10	42.4	0
Plastic limit clearance	42.8	9	43.1	0
Elastic limit clearance	46.7	9	44.9	0

築物により大きな被害が出ることが予想される。

参考文献

- [1] 磯部 大吾郎, 太田 外氣晴, 井上 智広, 松枝 富士雄: 長周期地震動を受ける隣接建築物の棟間衝突・崩壊解析, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, 2010, pp.4324-4329.
- [2] Kasai K, Jagiasi AR, Jeng V: Inelastic vibration phase theory for seismic pounding mitigation, ASCE Journal of Structural Engineering, 122 (10), 1996, pp.1136-46.
- [3] 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, 第 579 号, 2004, pp.39-46.
- [4] 濱田 直之, 平島 岳夫, 上杉 英樹: 高力ボルト梁継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, 2007, pp.41-42.
- [5] 藤本 健太郎, 濱田 直之, 瀬川, 紘史, 平島 岳夫, 上杉 英樹, 安部 武雄: 高力ボルト継手の耐火性に関する実験的研究 (その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, 2006, pp.105-110.
- [6] 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, Vol.B-1, 2008, pp.391-392.
- [7] 鈴木 淳一, 阿部 修太郎, 鈴木 弘之, 大宮 喜文, 若松 孝旺: 火災時における鋼架構の崩壊温度とリダンダンシー 耐震設計が耐火性能に与える効果, 日本建築学会構造系論文集, 第 608 号, 2006, pp.157-164.
- [8] 国土交通省: 建築構造設計基準の資料, 国営整第 69 号, 2011.