Peridynamics 破壊力学を用いた板ガラスの破壊解析に関する基礎的検討

Basic Study on Fracture Analysis of Flat Glass using Peridynamics Fracture Mechanics

柴田 良一・岐阜工業高等専門学校
建築学科

Ryoichi Shibata, Gifu National College of
Technology, Dept. Architecture

Key Words: Peridynamic Fracture Mechanics, Fracture Analysis, Flat Glass

論文要旨

建築物の強風による被害の中で飛来物の衝突によるものは、自然環境や飛来物体の条件也多様であり評価が困難な問題とされている。例えば、建築窓ガラスに対して台風などによる飛来物の衝突は、貫通した場合には気圧差により構造物全体を崩壊に導く恐れが指摘されている。そのため限定的な条件における実験的手法により、破壊現象の評価が進められているが対象条件も限られている。そこで数値解析的手法により破壊解析を実現できれば、様々な条件設定での破壊現象が評価できることが期待されている。そこで本研究では、Peridynamics 破壊力学を用いた数値解析を行い、実験的手法で得られた破損状況との定性的な比較を目的としている。

1. 研究目的

建築物の中で窓ガラスは台風の影響を受けやすい脆性材料のひとつである。窓ガラスが欠損すると、強風が室内に吹き込み、それが原因となる二次被害に繋がりがかねない。強風の吹き込みによる建築物の被害の原因には以下の2つが挙げられる。

(1) 飛来物の衝突による窓ガラス欠損

(2) 許容耐力を超える風圧が作用した場合の窓ガラス崩壊

建築物の建設において、各部材は許容耐力基準をもとに設計されている。そのため、後者は未然に防ぐことが十分可能であり、今後は前者を防ぐことが重要となる。各建築部材の破壊検証は多くが実験的手法で行われているが、大規模な建築物になるほど、同様の条件で実験的手法を用いるのは困難である。またガラスの破壊は建築物だけでなく、交通機関においても多用されており、同様な安全確保が必要である。

本研究では、実験で確認された板ガラスの破壊現象を数値解析的に再現し、結果を定性的に分析することで、有用性を検証することを目的とする。

2. 研究方法

破壊現象を、数値解析的に再現するために、亀裂や破断等の破壊現象を定式化する必要がある。そこで今回は、対象物全体を粒子でモデル化する手法である Peridynamics 破壊理論を用いて解析を行う¹⁾。この手法では、支配方程式として積分方程式を用いることで、一般的に数値解析で用いられる有限要素法では困難であった破壊現象を含めた全体挙動を表現することが可能である²⁾。

本研究では河井ら³⁾の衝撃実験と解析結果を比較し、分析を行う。比較する実験は、 20×40 mmの角材を 12.2 m/s(誤差 $\pm 2\%$)で衝突させたものとする。これは、ガラス開口部への飛来物に対する耐衝撃破壊性能評価方法である ISO16932 を検証するために、アメリカのハリケーンに対する性能標準試験に基づく ASTM0E1886-04 の方法で ASTM0E1996-04 に定められた加撃体条件である。

3. 解析方法

解析モデルを図1に示す。解析条件は河井らの実験と同様の条件に設定した。 900×1100 [mm]の板ガラスの端部から内

側 30mm まで四辺固定とし、 20×40 [mm]の鉄柱の速度を変化させ、ガラスの中央部に衝突させる。本研究では衝突面を表面、非衝突面を裏面と呼ぶ。

各ガラスにおける解析条件を表1に示す。普通フロートガラスの解析モデルは、厚さを $05 \cdot 6 \cdot 8 \cdot 10 \cdot 120$ [mm]としたものに、速度 $15 \cdot 20 \cdot 250$ [m/s]で鉄柱を衝突させる。合わせガラスの解析モデルは、厚さ 5mm のガラスを重ね、その境界面のフィルムの材料特性を、ポリビニルブチラール・ポリカーボネート(以下 PVB・PC とする)としたものに、速度 $15 \cdot 200$ [m/s]で鉄柱を衝突させる。

これまでのガラス材料の研究により、ガラスの強度は表面の細かい傷や端部の欠けなどの影響で著しく減少することが解明されている。この現象を考慮するために設計引張強度は、標準引張強度の $1/7$ 倍で計算される。本解析ではその理論に基づいて、解析モデルは設計引張強度を用いて設定を行った。

図1 飛来物衝撃実験の状態

表1 各ガラスに対する解析条件

ガラス種類	厚さ[mm]	衝突速度[m/s]
普通フロート ガラス	5	15・20・25
	6	
	8	
	10	
	12	
合わせガラス [厚さ10mm]	中間膜 素材	PVB PC
		15・20

4. 結果分析

4-1 普通フロートガラスについての比較

図2 衝突実験結果（文献2）より引用）

図3 衝突速度15m/sでの各厚さの解析結果

表2 普通フロートガラスの実験結果

厚さ[mm]	5	6	8	10	12
破壊範囲	狭い ←				→ 広い
破片サイズ	荒い ←				→ 細かい
破壊形状	円周	円周	円周	円周	放射
貫通	有	有	有	有	有

実験結果を図2、表面における各厚さの解析結果を図3に示す。実験結果の破壊状態をまとめたものを表2に示す。ガラスの厚みが増すに従って破壊範囲が大きくなること、破片が細くなること、飛来物が貫通することに関しては実験と同様に確認できた。破壊形状は円周状の破壊は確認できたが、衝突中心点から固定部まで放射状に広がる亀裂は確認できず、実験結果のように破片が不定形にならなかった。

4-2 合わせガラスについての比較

表3 合わせガラスの実験結果

図4 衝突実験結果（文献2）より引用）

厚さ[mm]	10.75
表面破壊形式	円周状
裏面破壊形式	放射状
貫通	無
中間膜素材	PVB

図5 衝突速度15m/sでの各条件の解析結果

実験結果を図4、表面における各フィルム特性の解析結果を図5に示す。実験結果の破壊状態をまとめたものを表3に示す。合わせガラスの破壊形式の特徴である、表面と裏面の破壊形式の違いに関しては、各解析条件において表面とほぼ同様な破壊形式となり、実験で見られた違いは確認できなかった。PVB フィルムを挟んだ合わせガラスに至っては、飛来物が貫通するという結果となった。

5. 考察

実験結果と解析結果が異なった大きな原因として、ガラスの状態に強く関与していると考えられる。生産段階で生じる表面の分子レベルでの細かな傷は方向性を持たない。飛来物の衝突によって生じた応力は、その傷によって偏り、規則性を持たない亀裂を生じさせる。解析に用いた設計引張強度も、面上に生じた傷を考慮し平均化した値であり、それを解析モデル全体に用いたとしても、不規則な亀裂を生じさせることはできない。

合わせガラスにおいては、別材料を挟むことで強度が増すことは確認できたが、両面における破壊形状の違いが確認できなかった。これは、フィルム厚さを正確に指定できなかったことが主な理由として考えられる。表面の円周状の破壊は、衝突点へのモーメントによりフィルムに放射状の引張力が生じることで起きるとされており、裏面の放射状の破壊は、フィルムが変形で円周状に裏面のガラスに引張力を生じさせるためだといわれている。そのため、フィルムを正確に再現することが必要であったといえる。

6. まとめ

本研究では、各ガラスの破壊現象の再現を目的とし、Peridynamics 破壊理論を用いて粒子モデルの解析を行った。その結果、厚みに対するガラス材料特有の破壊現象を再現することができた。しかし、本解析において設定上、ガラスの不規則性を考慮することができず、ガラスの本質的な破壊現象に対しては再現するに至らなかった。今後の改善点としては、不規則性の設定方法や、解析に有効なモデルの粒子間設定に関しての検討を進めていくことが必要だと考える。

謝辞

研究の実現や資料の提供については、平成 25 年度岐阜高専建築学科卒業の市橋崇稔君の全面的な支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考資料

- 1) S.Silling : Peridynamic States and Constitutive Modeling, J. Elasticity(2007), pp.151-184, 2007 年
- 2) 柴田良一, 田中正史, 加藤史郎 : Peridynamic 破壊力学を用いた構造部材の破壊解析に関する基礎的検討ー構造部材の粒子によるモデル化と強度の検証ー, 日本建築学会東海支部研究報告集 (51), pp.349-352, 2013 年
- 3) 河井宏允, 丸山敬, 西村宏昭 : 強風下における飛来物による外装材の破壊性状に関する研究, 基盤研究(B) 2008-2010 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 2011 年