

飛翔体衝突に伴う鉄筋コンクリート建築物の建屋内応力波伝播と 距離減衰特性に関する研究

Investigation on Stress Wave Propagation and Distance Attenuation Characteristics in Reinforced Concrete Structures Subjected to Projectile Impact

○正 奥田 幸彦^{*1,2}, 磯部 大吾郎^{*2}

Yukihiko OKUDA^{*1,2}, Daigoro ISOBE^{*2},

^{*1} 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

^{*2} 筑波大学 University of Tsukuba

The current regulatory requirements established in 2013 introduced new regulations addressing projectile impacts, including tornado-borne missiles and aircraft impacts, on nuclear facilities. Accordingly, the development of reliable assessment methods for projectile impact has become an important issue. However, knowledge regarding the effects of stress waves propagating through reinforced concrete (RC) buildings on equipment installed inside the buildings remains limited. In this study, the ASI-Gauss method is applied to evaluate the response distribution within an RC building subjected to impact loading. The effects of structural discontinuities on stress-wave propagation and response attenuation are investigated. The results demonstrate that structural discontinuities significantly reduce stress-wave propagation within the RC building.

Key Words : Projectile impact, Nuclear facility, Reinforced concrete, Stress wave, ASI-Gauss method, Shock isolation,

1. 緒 言

近年、原子力施設に対する外部事象への耐性向上が重要な課題となっている。特に、航空機や竜巻飛来物などの飛翔体が建屋へ衝突した場合、衝撃荷重により発生した応力波は鉄筋コンクリート (RC) 建屋内を高速で伝播し、建屋内部に設置された安全上重要な機器へ高周波の衝撃振動を与える可能性がある。

従来の飛翔体衝突研究では、建屋外壁の局部損傷評価に着目した研究⁽¹⁾⁽²⁾が多く、建屋内部へ伝播する応力波の挙動や建屋内の応答分布を対象とした研究事例は限られている⁽³⁾。また、建屋内の衝撃応答を設備の機能維持評価へ適用するためには機器設置位置での応答加速度の最大値を目安とし、衝撃入力位置からの距離と応答加速度との関係を定量的に把握することが重要である⁽⁴⁾。

そこで本研究では、その第一段階として ASI-Gauss 法⁽⁵⁾を用いて RC 建屋を模擬した簡易骨組モデルに衝撃荷重が作用した場合の応答加速度分布を評価し、建屋モデル内における応力波の距離減衰特性を定性的に明らかにした。さらに、建屋間に設けた衝撃絶縁に着目し、高周波縦波の伝播抑制効果および下流側建屋の応答低減効果について検討した。

2. 解析モデル

解析対象は、図 1 に示す RC 造 4 層 4×4 スパンのラーメン構造を模擬した三次元骨組モデルであり、建屋底面を完全固定とした。解析には ASI-Gauss 法に基づく解析コード ASIFEM⁽⁶⁾を用いた。解析モデルは 385 節点、520 要素で構成され、各部材にはチモシェンコ梁要素を用いた。

表 1 に RC 部材の材料特性を示す。本解析では、RC 部材を均質な線形弾性材料としてモデル化した。コンクリートの設計基準強度は 29.9 MPa、鉄筋比は 0.4 %とし⁽⁷⁾、コンクリートおよび鉄筋の材料特性は原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2021) ⁽⁸⁾に基づき設定し、RC 部材の等価ヤング率は複合則により算出した。

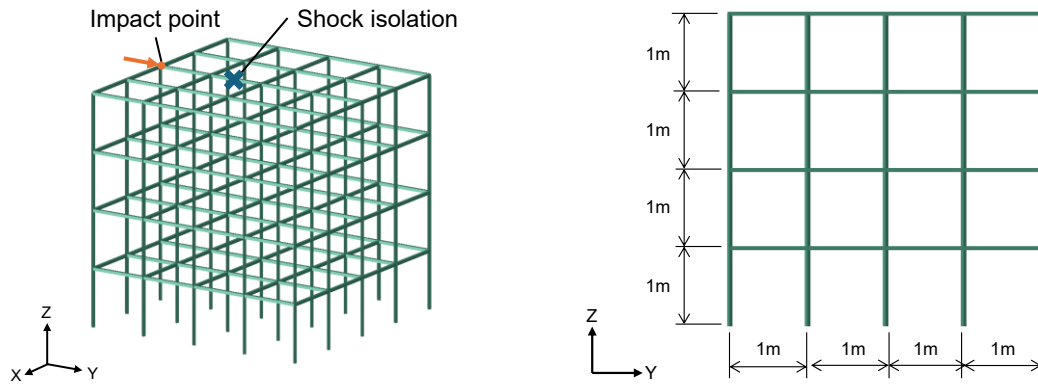


Fig. 1 FE model of the RC structure

Table 1 Material properties

Material	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio [-]	Density [kg/m ³]
RC column (□50 mm)	25100	0.2	2450

3. 解析条件

本検討では、衝撃荷重による応力波の距離減衰特性を評価するため、衝撃荷重点から応力波伝播経路に沿って 1.5 m の位置に衝撃絶縁を設けた。具体的には、当該位置にある節点間の接続を切断することにより、衝撃絶縁をモデル化した。解析ケースは、図 1 に示す衝撃絶縁を設けない基準ケースと、衝撃荷重点から 1.5 m の位置に衝撃絶縁を設けた衝撃絶縁ケースの 2 ケースとし、それぞれの代表点における応答加速度を比較した。

飛翔体衝突を模擬するため、建屋外壁中央上部の衝撃荷重点に Y 方向の衝撃荷重を作用させ、建屋中央上部の Y 方向に沿った代表点における応答加速度を評価した。図 2 に衝撃荷重点に入力した荷重時刻歴を示す。入力荷重は建屋の一次固有振動数 4.1 Hz に比べて十分高い 100 Hz の半サイクル正弦波とした。

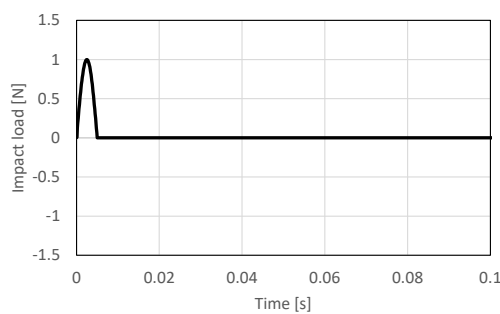


Fig. 2 Time history of the input load (Half-sine pulse (100 Hz))

4. 解析結果および考察

4・1 建屋内応答加速度の時刻歴

図 3 に衝撃絶縁を設けない基準ケースにおける評価ライン上の応答加速度時刻歴を示す。基準ケースでは、衝撃荷重点近傍で大きな応答加速度が生じ、代表点の応答波形はほぼ同一の周期性を示し、建屋全体へ応力波が伝播していることが確認された。

図4に衝撃絶縁ケースにおける評価ライン上の応答加速度時刻歴を示す。なお、他の伝播経路を介した応力波の回り込みによる影響は十分に小さいと考えられることから、本検討では評価ライン上の応答を比較した。衝撃絶縁ケースでは、衝撃荷重点近傍で大きな応答加速度が生じるものの、絶縁位置を境として代表点における高周波数成分が大幅に低減した。これは、衝撃絶縁により応力波の伝播が抑制され、応答が高周波数成分から低周波数成分へ移行したためと考えられる。また、絶縁位置を境として応答波形の位相が反転し、約27 Hzの卓越した振動成分が認められた。これらの結果から、飛翔体衝突時の建屋内応答は構造物の連続性に大きく依存し、建屋間に衝撃絶縁を設けることで応力波の伝播を抑制し、下流側構造の応答加速度を低減できることが示された。

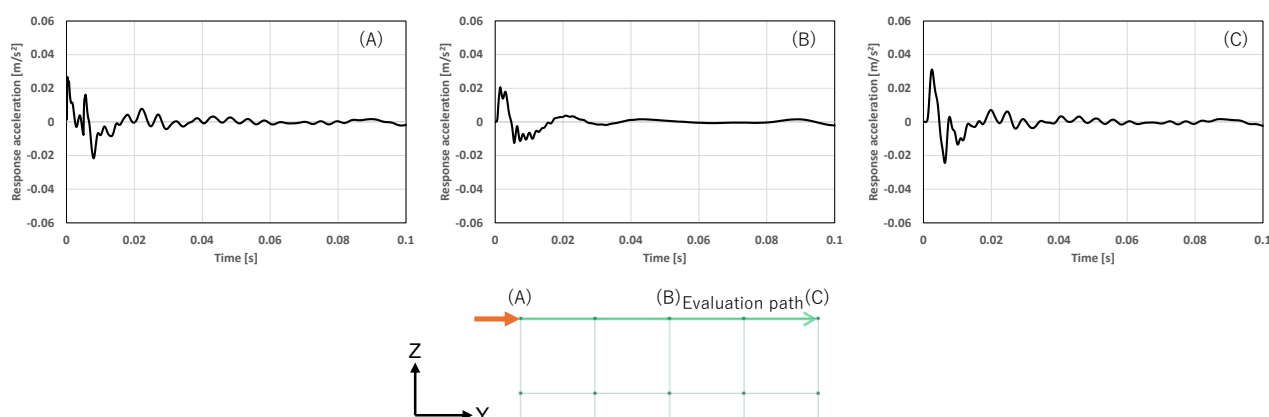


Fig. 3 Response acceleration histories along the evaluation line (Reference case without shock isolation)

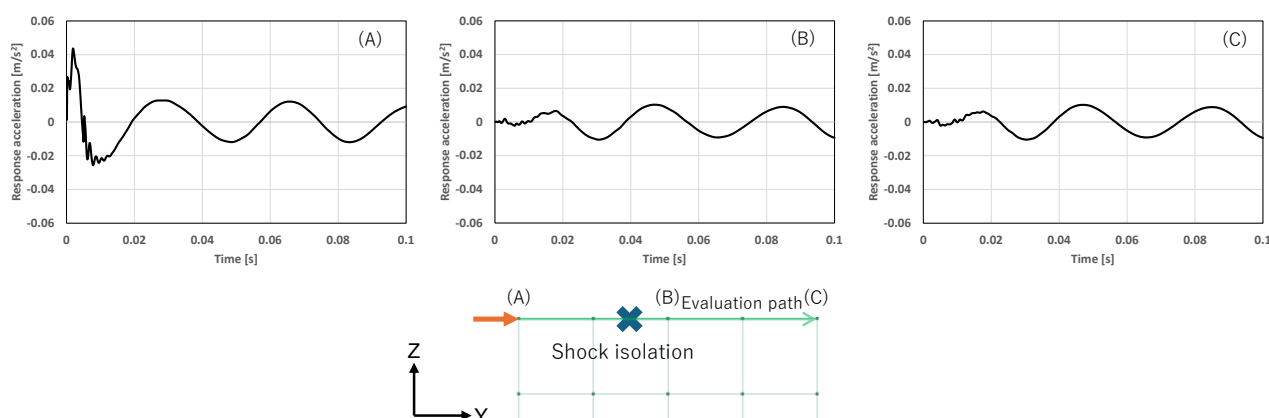


Fig. 4 Response acceleration histories along the evaluation line (Shock isolation case)

4・2 衝撃絶縁が応力波伝播に及ぼす影響

図5に基準ケース及び衝撃絶縁ケースにおける衝撃荷重点からの距離と最大応答加速度倍率（各点での最大応答加速度／衝撃荷重点(A)での最大応答加速度）との関係を比較して示す。基準ケースでは最大応答加速度倍率は概ね0.77～1.17の範囲で推移し、顕著な距離減衰は認められなかった。これは、連続した骨組構造を介して応力波が効率よく伝播したためと考えられる。また、衝撃絶縁ケースでは、絶縁位置を境として最大応答加速度倍率が約1.0から約0.23まで大幅に低下した。このことから、衝撃絶縁を設けることで顕著な応答低減効果が得られる可能性が示された。飛翔体衝突時の建屋内設備の耐衝撃評価では、設備に入力される最大応答加速度が重要な評価指標の一つであり、設備ごとに設定された機能確認済み加速度との比較により、機能維持性を評価することが考えられる。本解析結果は、衝撃絶縁により設備への入力加速度を低減できる可能性を示しており、建屋内設備の耐衝撃性向上に有効な手法となり得ることを示唆している。

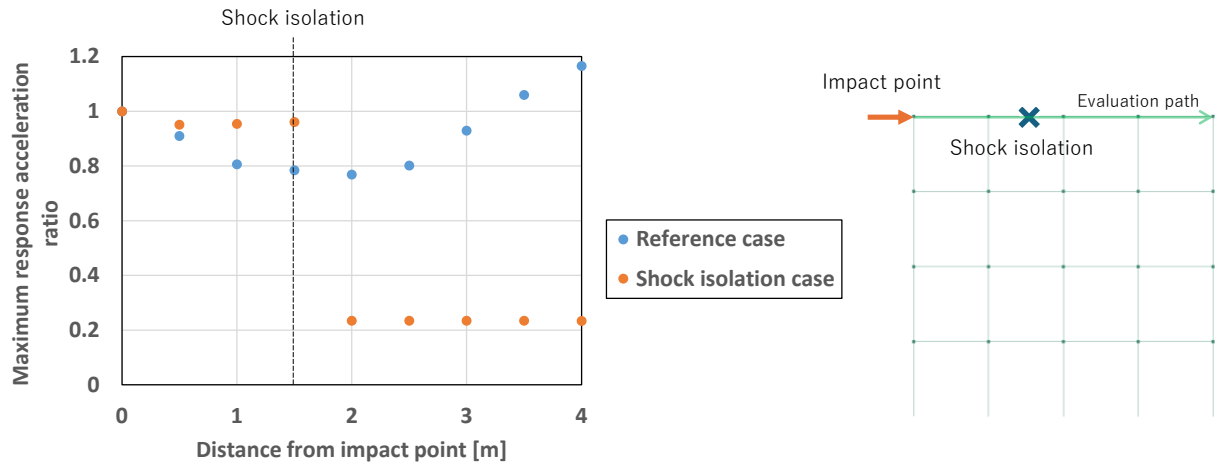


Fig. 5 Effect of shock isolation on the distance attenuation of maximum response acceleration ratio

5. 結論

本研究では、ASI-Gauss 法を用いて RC 建屋を模擬した簡易骨組モデルに衝撃荷重を作用させた場合の応答加速度を評価し、建屋内における応力波の距離減衰特性および衝撃絶縁による応答低減効果について検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 衝撃絶縁を設けない基準ケースでは、最大応答加速度倍率は概ね 0.77～1.17 の範囲で推移し、評価ライン上において顕著な距離減衰は認められなかった。
- 衝撃絶縁ケースでは、絶縁位置を境として高周波数成分が大幅に低減するとともに、最大応答加速度倍率が約 1.0 から約 0.23 まで低下した。このことから、衝撃絶縁により応力波の伝播を抑制し、下流側構造の応答加速度を低減できることが示された。
- 以上より、衝撃絶縁は飛翔体衝突時に建屋内設備へ入力される最大応答加速度を低減し、設備の耐衝撃性向上に有効な手法となり得ることが示唆された。

今後は、評価経路以外の伝播経路を介した応力波の回り込みによる影響等を確認するため、衝撃荷重の方向や衝撃絶縁の位置等をパラメータとした解析を実施するとともに、RC 部材の非線形性を考慮した検討を進め、衝撃絶縁を活用した応答低減方法の確立を目指す。

文 献

- (1) Kennedy, R. P., A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects, Nuclear Engineering and Design, Vol. 37, No.2, pp.183–203, 1976.
- (2) Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M. and Telford, A. R., Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No.1–4, pp.224–284, 2005.
- (3) OECD Nuclear Energy Agency (NEA), Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles – IRIS Phase 3 Final Report, NEA/CSNI/R(2023)5, 2023.
- (4) Wörmle, P., Borsutzky, R. and Schubert, T., Aircraft Impact: Critical Aspects of Coupled Dynamic Simulations, Proc. of the 26th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 26), 2022.
- (5) 磯部大吾郎, はり要素で解く構造動力学—建物の崩壊解析からロボット機構の制御まで, 丸善出版, 2020.
- (6) ASI-Gauss 法による骨組構造の有限要素解析コード ASIFEM (ダウンロードサイト), 筑波大学, <https://www.kz.tsukuba.ac.jp/~isobe/asifem.html> (2026 年 7 月 28 日閲覧)。
- (7) Okuda, Y., Nishida, A., Kang, Z. Y., Tsubota, H. and Li, Y., Experimental Study on Local Damage to Reinforced Concrete Panels Subjected to Oblique Impact by Projectiles, J. Nucl. Eng. Radiat. Sci., Vol. 9, No.2, 021801, 2023.
- (8) 原子力規格委員会, 原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2021, 日本電気協会, 2023.