

(13) 大規模構造物への航空機衝突による衝撃振動解析

A Study of Vibration induced by the Air Plane Impact Load on the Large-scale Structure

眞鍋慶生*, 丹羽一邦*
Yoshio Manabe Kazukuni Niwa

*株式会社テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島3丁目21番4号)

キーワード: 航空機衝突, 振動, RC 構造物, 衝撃荷重
(Air Plane Crash, Vibration, RC Structure, Impact Load)

1. 概要

2001年の同時多発テロ事件以来, 重要構造物の安全性評価が行われてきた. 航空機衝突では衝撃荷重負荷時間は1秒以下⁽¹⁾であり, これまで直接的な破壊・崩壊強度評価が行われているが, 衝撃荷重により発生した振動が建屋に与える影響について十分な検討が行われていない.

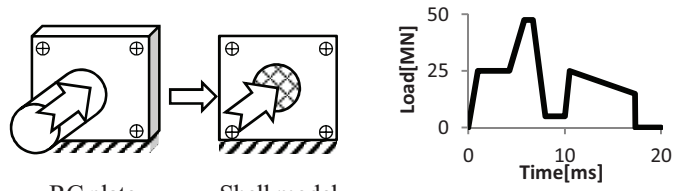
本研究では汎用構造解析コード LS-DYNA⁽²⁾を用いて B747-400 が約 500km/h で原子炉建屋に衝突することを想定し鉄筋コンクリート(RC)壁の損傷を考慮した衝撃振動解析を実施する. 先ず既存の実験結果を使用しモデル化の妥当性を確認する. 次に原子炉建屋モデルにて荷重位置をパラメータとした共振や振動モードの傾向について検討を行う.

2. シェル要素による検証モデル

本研究では構造物のモデル化に積層シェル要素を使用する. シェル要素によるモデル化の妥当性確認のため Sugano⁽³⁾らの実験結果を用いて RC 版の衝撃変形と破壊現象について検証を行う.

2.1 計算条件

Sugano らの衝突実験は, 縦 7m 横 7m 板厚 1.6m で, 四隅をボルトで固定された垂直に起立する RC 版を用いている. Fig.1 に解析モデルを示す. シェル要素は要素サイズを 200mm 基準で作成し, 板厚方向に鉄筋層とコンクリート層合わせて 9 層の積層シェル要素とした. 9 層のうち表裏から 2 層目を鉄筋層とし, 独立な直行異方性弾塑性材料とした. また, その他はコンクリート層で引張ひび割れと圧潰, 軟化を考慮した圧縮強度 30MPa の異方性モデルとした. 衝撃荷重は Fig.2 に示す荷重履歴を, 飛翔体が衝突する領域に負荷した.



RC plate Shell model
Fig.1 RC plate and shell model

Fig.2 History of impact load

2.2 解析結果

Fig.3, 4 に実験結果のひび割れ分布と積層シェル要素を使用した表裏層でのクラックコンターとの比較図を示す. コンターレベルは灰色が面内 1 方向ひび割れ, 黒色が面内 2 方向ひび割れとなる. クラックの傾向や領域については定性的に一致している.

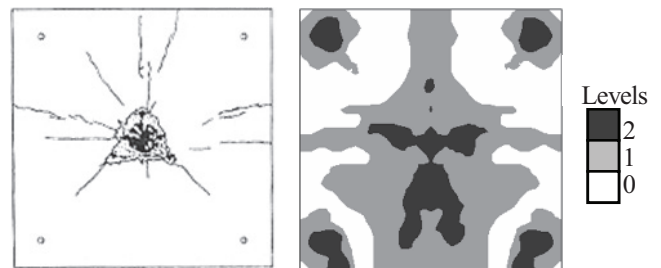


Fig.3 Comparison of front surface crack

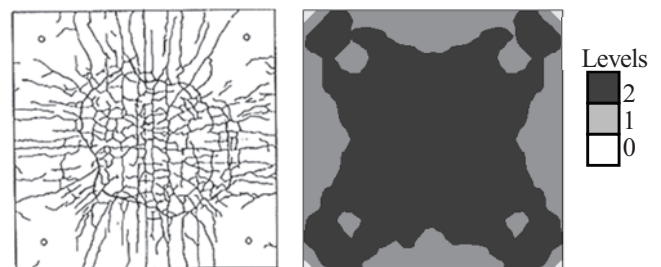


Fig.4 Comparison of back surface crack

Fig.5にRC版裏面中央部の変位履歴の比較を示す。実験結果と検証モデルによる解析結果は良く一致している。

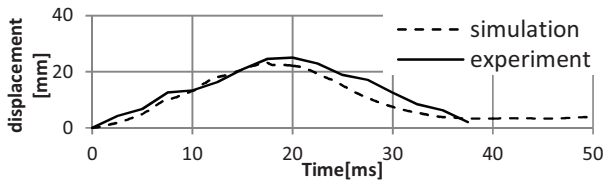


Fig.5 Comparison of displacements at the back side center of RC plate

以上より, RC版の衝撃変形と破壊現象は積層シェル要素モデルを使って精度良く解析できることを確認した。

3. 大規模モデルの計算

3.1 解析条件

Fig.6は, 前章で検証した積層シェル要素にてモデル化を行った幅100m, 奥行70m, 高さ75mの5階建原子炉建屋のRC構造物である。外壁の板厚は1.6mとし, 内部は厚さ1mの壁と床で構成され10~20m角の部屋に仕切られている。各階毎の部屋の配置は同一としている。使用する物性については, コンクリート圧縮強度を30MPaとし, 鉄筋比は2%を基準としてモデル化を行った。RC材との比較を行うために弾性体建屋についても解析を行った。Fig.6の4階外壁中央にFig.7の「Scale1.0」で示す *riera*⁽⁴⁾の式を基にして作成したB747-400相当の衝撃荷重履歴を負荷した。荷重が入力される領域は航空機の正面投影面積と同じ円形領域とした。また, Fig.7の荷重の大きさを0.1, 0.5倍したScale0.1, Scale0.5についても解析を行った。減衰として質量比例減衰3%⁽⁵⁾を設定した。

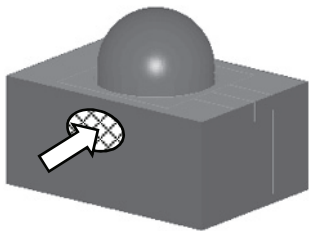


Fig.6 Model of Large-scale Structure

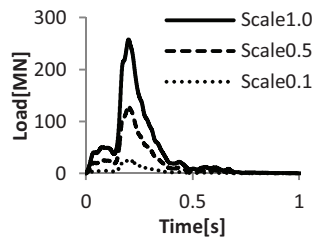


Fig.7 History of impact load

3.2 解析結果

Fig.8にScale1.0の衝撃荷重を負荷した時の外壁クラックコンターを, Fig.9に荷重Scale1.0とScale0.5の衝突点近傍の断面拡大図を示す。衝突点の上下階でクラックの発生が顕著であり, Scale0.5はScale1.0よりもクラック発生範囲が小さく, Scale0.1ではクラックは発生しなかった。Fig.8の点A, B, Cは, 衝撃荷重による4階床の振動評価点を示している。点Aは荷重点近傍, 点B, Cはそれぞれ荷重点から約50m, 70mの位置である。Fig.10に建屋を

(a)弾性体, (b)RC材とした場合の点Bの上下方向加速度履歴を示す。ともに最大加速度は約1.0Gだが, Fig.11に示すフーリエスペクトルの周波数成分は(a)弾性体では50Hz以下が支配的であり, 一方(b)RC材では50Hz-150Hzにも最大約0.04G程度の高周波振動が発生している。

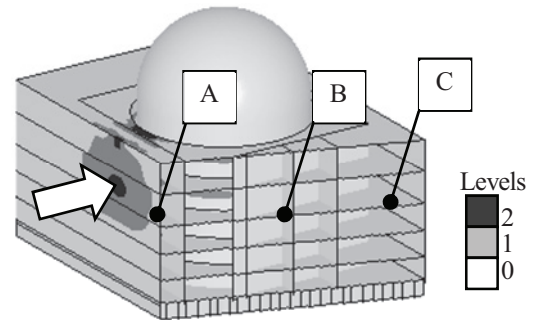


Fig.8 Crack contour of Scale1.0 load and evaluating point of response

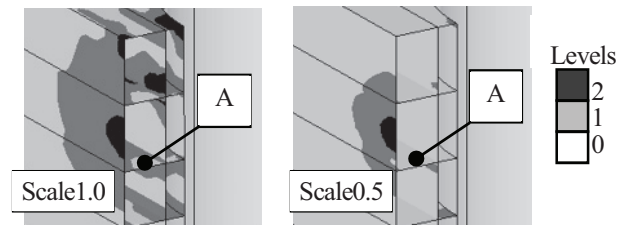
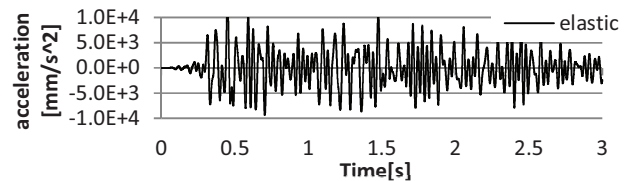
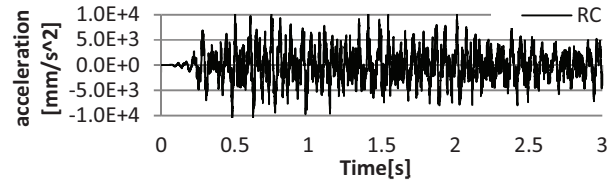


Fig.9 Crack contour around the Scale1.0 and Scale0.5 load point

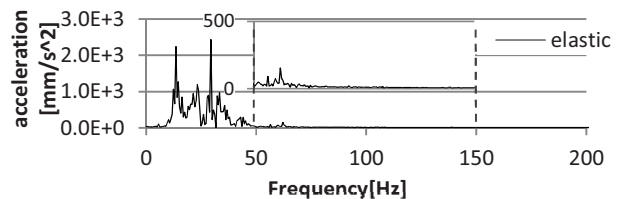


(a)Acceleration history of elastic

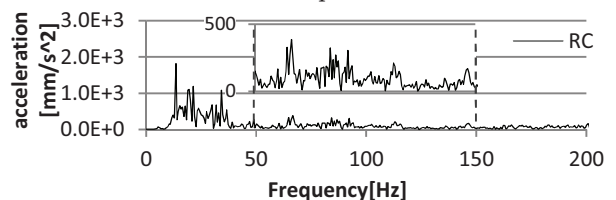


(b)Acceleration history of RC

Fig.10 History of acceleration at point B



(a)Fourier spectrum of elastic



(b)Fourier spectrum of RC

Fig.11 Fourier spectrum of acceleration at point B

Fig.12, 13 は点 A における加速度の床応答スペクトル (FRS) である。Fig.12 の弾性材の応答では荷重の増加と共に加速度は比例的に増大するが、周波数特性の変化はない。一方 Fig.13 の RC 材の応答について Scale0.1 では弾性材と同じ応答となるが、荷重の増大による応答の増大は比例的ではない。また振動成分には 100Hz 以上の高周波振動が発生している。これは、Fig.9 に示したように Scale1.0 では屋内壁まで面内二方向ひび割れが発生し、壁と床の接合部に生じた損傷が局所的な剛性低下を起し、リンク機構を構成することで高周波振動を誘起したと考えられる。

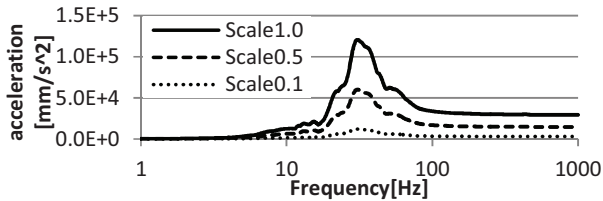


Fig.12 FRS at a point A on the floor with elastic material

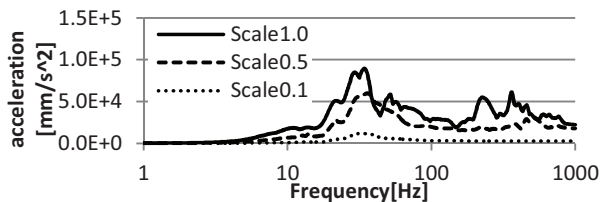


Fig.13 FRS at a point A on the floor with RC material

Fig.14 に RC 材で荷重 Scale1.0 の場合の荷重負荷壁から最遠点 C の FRS を示す。約 50Hz までは弾性材と同じ応答を示すが、それ以上の周波数では RC 材の加速度が高くなっている。これは点 C の周辺にクラックの発生がない為、点 A のような剛性低下による周波数特性の変化ではなく、荷重負荷壁近傍で発生した衝撃による高周波振動が影響したと考えられる。

Fig.14 上に示す図は、点 C を含む約 20m 角の床平板の面外方向固有振動モードを示している。1 次と 3 次の振動モードは、約 7Hz と約 25Hz の加速度応答である。一方、弾性材の振動では生じていない約 70Hz の 5 次の振動モードが衝撃振動により誘起された振動モードであることがわかる。

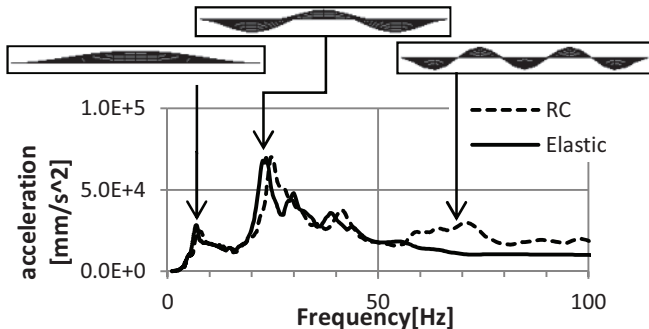


Fig.14 Comparison of FRS at point C on elastic and RC materials

Fig.15 に RC 材で荷重 Scale1.0 の場合の点 A, B, C の FRS の比較を示す。点 C は点 B よりも荷重点から遠いが、矢印で示す周波数は点 B よりも応答加速度は高くなっている。これは Fig.14 に示した点 C の 3, 5 次の固有振動モードに対応しており、荷重点近傍(点 A)の高周波振動特性が、点 C の床の固有振動モードを誘起する場合には、距離に関係なく高い応答の振動モードを発生させることを表している。

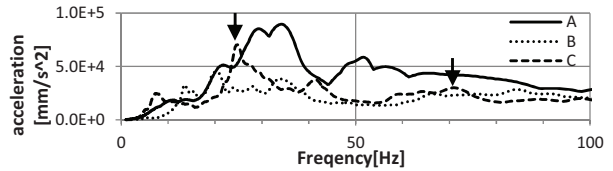


Fig.15 Comparison of FRS on evaluating points A, B, C

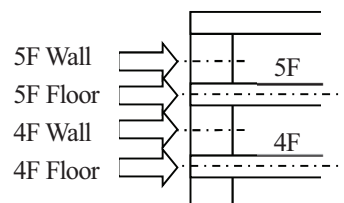
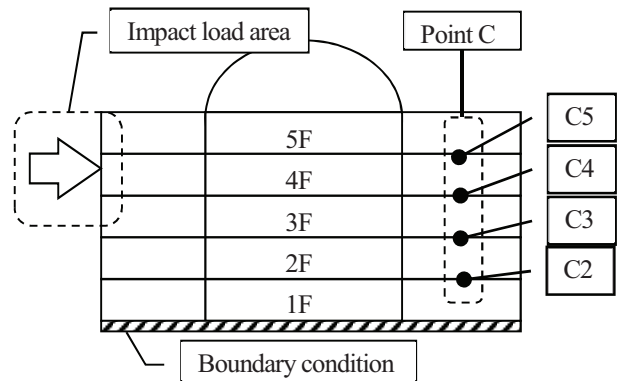
4. 衝撃荷重入力の高さ方向の影響

3 章までは 4 階外壁中央を中心とする円形領域に荷重を负荷したが、ここでは荷重荷重位置が高さ方向に変化した場合の建屋振動応答への影響について検討する。

4.1 解析条件

Fig.16(a)に荷重入力位置と評価点位置の概要を示す。上下方向加速度履歴の評価点として、点 C の位置の各階の床位置を設定する。これら評価点を C2~C5 とする。1 階については地盤として完全拘束条件としたため今回の評価点からは除外する。

Fig.16(b)に荷重入力位置の詳細図を示す。荷重領域は 3 章と同様で、入力荷重は Fig.7 で示した Scale1.0 とする。荷重中心位置が 4 階、5 階の床中心位置、壁中心位置となるように設定をした。



(b) Impact load input area Close-up

Fig.16 Impact load input and Output area

4.2 解析結果の荷重位置による検討

Table.1, 2, 3 に示すのは C2~C5 の FRS を計算し, 各床が 1 次, 3 次, 5 次振動モードとなる 7Hz, 25Hz, 70Hz 付近での極大値を表にしたものである。検査対象範囲は±5Hz とした。

Table.1 では荷重入力位置に関係なく評価点位置が高くなるに従い FRS の値が大きくなっている事がわかる。

Table.2 では C4, C5 の加速度スペクトルの値は大きくなる傾向が確認できる。しかし, 5 階壁に荷重を付加した際の C2 の加速度スペクトルも大きくなっている。これは距離, 高さ方向ともに荷重負荷領域から最遠点になるが 25Hz 付近の振動モードが励起されたものである。

Table.3 では全体的に加速度スペクトルの値は Table.2 と比べて小さくなる傾向ではあるが, 荷重を負荷する位置が高くなるにつれて加速度スペクトルの値が大きくなる傾向となっている。

Table.1, 2, 3 を比較すると 1 次振動モード(7Hz)では評価点が高くなるに従い FRS が大きくなる傾向にある。5 次振動モード(70Hz)では荷重負荷領域が高くなるに従い FRS が大きくなる傾向にある。3 次振動モード(25Hz)では共振している C2 を除き, 荷重負荷領域が同じ階に大きな応答があり荷重負荷の影響が最も現れている。

Table.1 Maximal value of FRS at 7±5Hz (10^4mm/s^2)

	C2	C3	C4	C5
4F Floor	1.19	1.79	2.35	3.46
4F Wall	1.32	1.96	2.44	3.62
5F Floor	1.38	2.01	2.65	3.82
5F Wall	1.23	1.79	2.28	3.34

Table.2 Maximal value of FRS at 25±5Hz (10^4mm/s^2)

	C2	C3	C4	C5
4F Floor	1.55	2.24	3.41	6.71
4F Wall	2.49	3.33	7.01	5.25
5F Floor	2.07	2.68	6.55	4.71
5F Wall	5.08	3.89	6.96	6.71

Table.3 Maximal value of FRS at 70±5Hz (10^4mm/s^2)

	C2	C3	C4	C5
4F Floor	2.39	2.52	2.25	2.36
4F Wall	1.68	1.91	2.99	1.99
5F Floor	1.78	2.97	2.78	2.39
5F Wall	3.50	3.58	3.33	3.57

4.3 解析結果の FRS による検討

Fig.17 に荷重した荷重領域毎の代表点として C2, C4 を選び, その FRS を示す。実線は C4, 破線は C2 の FRS を表している。

ピークの波形の傾向として C4 では特定の振動モードが卓越し FRS のピーク幅が広がるが, C2 では FRS のピーク幅は狭まり特定の固有振動モード付近のみ卓越している傾向が確認できる。この時, 共振により C4 よりも高い FRS となる場合が認められる。

壁中央に荷重を負荷した Fig.17(b), (d) の C2, C4 の FRS 波形について大きさは異なるが形状は同じ傾向にあり,

各階の床は同じ振動モードが支配的になりやすい現象であると考えられる。これに対し, 床位置に荷重を負荷した Fig.17(a), (c) は両者の波形の傾向が変化する部分が認められることから各階での振動モードは異なっている。

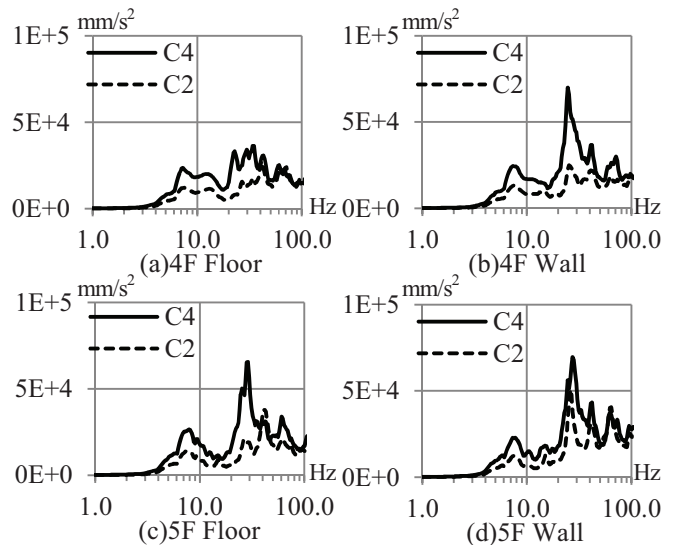


Fig.17 FRS at a point C2, C4 by load area

5. まとめ

RC 版の衝撃変形と破壊現象について実験解析を行い, 実験結果と比較検討することによって積層シェル要素によるモデルの妥当性を示した。このモデルを実規模原子炉建屋の衝撃振動解析に適用し, 衝撃荷重による壁と床の損傷および床の高周波振動応答について検討した。壁と床の損傷による局所的な剛性低下が高周波振動の要因となること, 荷重点から離れた位置では共振により高周波の振動モードが誘起される可能性があることを示した。各階の FRS と荷重負荷高さの影響を整理し, 高次の振動モードが発生し得る傾向を明らかにした。

参考文献

- 1) 丹羽ほか, 飛翔体による鋼板コンクリート版の衝撃破壊シミュレーション, 第20回計算力学講演会 公演論文集 No.1406(2007)
- 2) LS-DYNA User's Manual ver.971, Livermore Software Technology Corporation, (1970)
- 3) T.Sugano, et al., Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force, Nuclear Engineering and Design 140, (1993), 373-385.
- 4) J.D.Riera, A critical reappraisal of nuclear power plant safety, Nuclear Engineering and Design 57, (1980)
- 5) J.D.Stevenson, Structural damping values as a function of dynamic response stress and deformation levels, Nuclear Engineering and Design 60, (1980), 211-237