

(21) 飛翔体に対する鋼板コンクリート版の耐衝撃強度解析

NUMERICAL SIMULATION OF THE STRENGTH OF STEEL PLATE REINFORCED CONCRETE SLAB SUBJECTED TO MISSILE IMPACT LOADING

丹羽一邦*、小島 功**、大橋泰裕***、門口 徹****

Kazukuni NIWA, Isao Kojima, Yasuhiro Ohashi and Toru Kadoguchi

*工修 (株) テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島3丁目31-6 大塚ビル4F)

**工修 清水建設株式会社 原子力技術部 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館)

***工修 清水建設株式会社 原子力技術部 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーバンスS館)

****工 (株) テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島3丁目31-6 大塚ビル4F)

キーワード: 鋼板コンクリート版、飛翔体衝撃荷重、衝撃破壊、FEMシミュレーション

(Steel plate reinforced concrete, Missile Impact loading, impact fracture, FEM simulation)

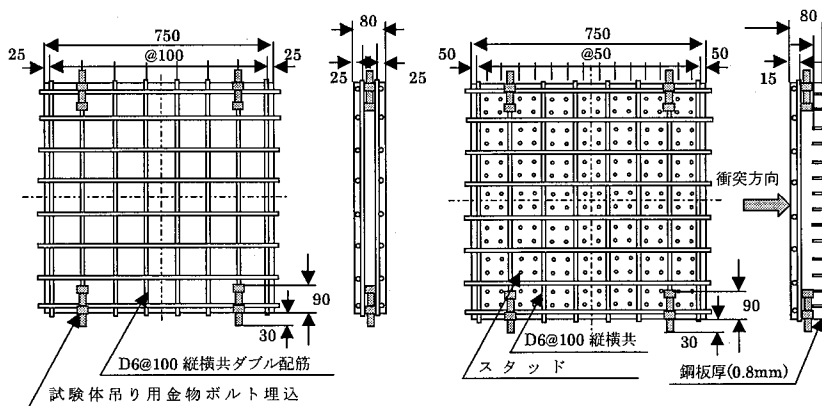
1. はじめに

9.11 WTCの事故以来、原子力施設等の重要構造物に対する耐衝撃強度の評価に関連した研究が進んでいる。鋼板でコンクリートを補強する鋼板コンクリートは、従来の鉄筋コンクリート(以下RC)に比べ、耐衝撃強度が向上することが報告されている。本論文では、小島¹⁾らの「高速飛翔体の衝突に対する鋼板コンクリート版の局所破壊に関する研究」で報告された実験結果を基に、市販解析コードLS-DYNAによる衝撃破壊解析を実施し、衝突速度とコンクリートおよび鋼板厚による破壊モード、貫通、鋼板の裂け、非貫通の相違を解析によって検証する。また、コンクリートの破壊条件としてせん断歪みあるいは主ひずみ、鋼板の破壊条件として塑性歪みを採用し、衝突速度とコンクリートおよび鋼板厚によらず、実験での破壊モードなどの挙動が解析によってシミュレートできることを示す。

2. 実験概要

小島らは剛体飛翔体および柔飛翔体による鋼板コンクリートの強度評価を、コンクリート版厚、鋼板厚、衝突速度について実験により検討している。図1. は実験に用いたコンクリート版の一例で、(a)RC試験体は従来の鉄筋コンクリート版(b)HSC試験体は、コンクリート表面側に鉄筋を配し、裏面に鋼板をスタッドで固定したものである。また、図2. に剛飛翔体と柔飛翔体を示す。

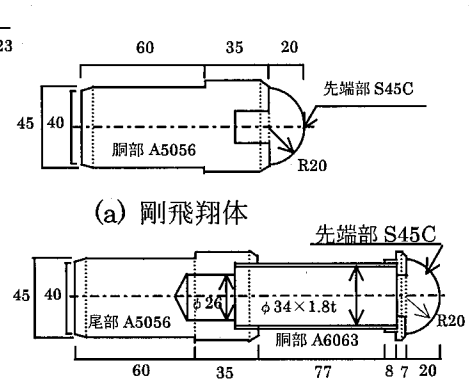
これらの試験体に剛飛翔体と柔飛翔体を高速で衝突させた、試験体版厚80mmの場合の実験条件とコンクリート破損状況結果の一例を表1に示す。これらの実験により、小島らはRC版よりもHSC版の方が破壊程度が少なく、HSC版では、飛翔体速度が小さく、鋼板厚が厚いほど、また、剛飛翔体よりも柔飛翔体に対する方が破壊の程度が少なくなることを示し、これらの関係の実験評価手法を提案している。



(a) RC 試験体

(b) HSC 試験体

図1. 鋼板コンクリート



(a) 剛飛翔体

(b) 柔飛翔体

図2. 飛翔体

3. LS-DYNA の衝撃解析手法²⁾

LS-DYNA の衝撃解析アルゴリズムには、運動方程式の時間積分に中央差分法と集中質量を利用した陽解法による求解手法を採用している。空間の離散化は有限要素法によって行われている。要素は低次アイソパラメトリック要素で、次数低減 1 点積分により剛性を評価している。また、アワーグラスコントロールの補正には Hollquist 等の粘性型抵抗力を要素節点に加えている。接触計算手法では、蛇腹状に座屈する接触問題や破壊を伴う複雑な接触問題に対処するため、接触の判定や反力計算に要素セグメント毎にペナルティー法を用いた計算手法が採用されている。これにより面での接触だけでなくエッジでの接触計算が精度良く行われている。

4. 解析モデル

4. 1 コンクリートの有限要素モデル

コンクリート試験体は形状対称性を考慮し、1/4 モデルとした。80mm の板厚方向をソリッド要素で 20 分割し、1/2 幅方向には 90 分割した。

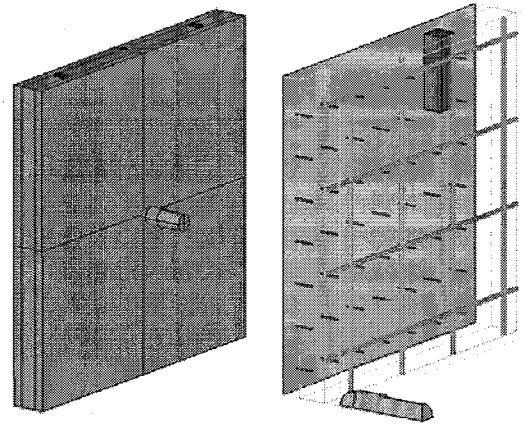
コンクリートの強度は 30MPa、材料構成則は圧力依存の弾塑性モデルとし、圧潰とスポール破壊が模擬できるモデルを利用した。特にコンクリートの圧縮特性には、圧縮強度以降の軟化と残差強度を考慮した。これらの特性の決定には、藤掛らの 3 軸圧縮載荷試験結果³⁾を参考にした。

コンクリートの破壊には、1) スポール破壊のような局所的な引張側応力による破壊、2) 主応力方向に直交する引張りひび割れ破壊、3) 衝撃圧縮による圧縮破壊を考える。1) は衝撃による圧縮応力波がコンクリートの裏面で膨張波として反射する結果生じ、引張側の圧力により判定する。2) については曲げやせん断による引張り領域に発生し、引張応力で判定する。3) は衝突面にクレータの発生と圧潰を引き起こすと考えられるが、圧潰はコンクリート圧縮軟化剛性特性として考慮する。

貫通など材料の破断と飛散を表現するために、破壊したコンクリート要素の削除を行った。要素削除の判定基準には、4) スポール破壊と 5) 圧潰をそれぞれ考慮し、要素消去引張圧力値には引張破壊圧力、圧潰要素の消去にはせん断ひずみあるいは主ひずみを用いた。

4. 2 鋼板、スタッド、鉄筋の有限要素モデル

鋼板 (SS400) はシェル要素、スタッドと鉄筋 (SD345 相当) はビーム要素でモデル化した。鋼板とコンクリートの付着については、完全付着の場合と、付着無しの場合を検討した。鉄筋とスタッドは共にコンクリートとは完全付着とし、スタッドは鋼



(a) 全体モデル (b) 鋼板・スタッド・鉄筋

図 3. 鋼板コンクリート版と飛翔体の解析モデル

板と溶接結合され、溶接破壊も考慮した。

4. 3 飛翔体の有限要素モデル

飛翔体は剛飛翔体と柔飛翔体を検討した。剛飛翔体では剛体要素、柔飛翔体では頭部以外は変形体とした。どちらの飛翔体も質量は 487g である。また柔飛翔体では、静的圧縮試験結果と解析との整合性をあらかじめ検証した。

4. 4 解析条件の設定

飛翔体には初速度を与え、コンクリート版との間に接触条件を設定して衝撃力を発生させた。コンクリートは、衝撃力により破壊して要素消去されるが、飛翔体との接触は破壊後に残った要素とも自動的に接触計算の処理が行えるよう設定した。また、飛翔体とコンクリートだけでなく、鉄筋、スタッド、鋼板との間のそれぞれの接触処理も考慮した。

5. 解析結果

ここでは、表 1 の実験結果に相当する解析結果が得られるような、条件、特に解析モデル、破壊モデルなどをパラメータサーチによって検討し、実験条件が変わってもこれらの解析条件が一貫して利用できるモデルを検証する。

5. 1 RC 版の衝撃破壊解析

表 1 中の試験体名称 RC-2 で示した RC 版の飛翔体衝撃解析では、コンクリートのクレータとスポール破壊が生じる。これらの破壊判定には、著者の一人⁴⁾が既に報告しているように、クレータ破壊は最大せん断ひずみ、スポール破壊は引張り圧力による要素消去が有効である。図 4 と表 1 には要素消去せん断ひずみ 0.3、要素消去引張り圧力を引張破壊強度の 3 倍とした場合の破壊の様子と大きさを示し、実験の結果とよく一致していることがわかる。

5. 2 鋼板コンクリートの破壊のモデル化

ここでは表1の試験体HSC-12のケースについて解析を実施し、鋼板コンクリートの破壊挙動に着目した検討を行う。

まず、鋼板コンクリートの飛翔体衝撃解析に対して、5.1節のRC版の解析と同じ要素消去条件で解析した結果を図5に示す。図に示すように裏面剥離によって消去される要素が同様に生じる。しかしながら、鋼板が破壊しない限り、コンクリート裏面側でコンクリートの破壊が生じ粒状破片になったとしても消失するわけではなく、鋼板との間に閉じこめられて、圧縮時には依然としてある程度の強度を有すると想像される。このことから、鋼板コンクリートについては、裏面の破壊に対して要素消去をするのは実際的ではない。図5に示した裏面の様子は、スポールの発生と、スタッドの引き抜きによる破壊が生じるが、そのことによる要素消去の影響が顕著で、妥当な挙動とはならない。

そこで、引張圧力による要素消去をしない場合について検討した。ただし、引張圧力破壊の判定は行い、引張り力の伝達はさせない条件とした。この条件の結果は、図6に示すように、クレーターが小さく、要素消去による破壊は飛翔体貫入部位の周囲に余り広がらないまま飛翔体が貫通する結果となる。これは、クレーター破壊の形成にせん断破壊だけでなく引張破壊も寄与しているためであると考えられる。図には、圧潰後に生じる塑性ひずみコンターを示し、要素の消去されない破壊についてもその領域を推定できると考えられる。

次に、破壊せん断ひずみの値を大きくとり破壊挙動を確認した。図7にこの結果を示す。要素消去によるクレーターのサイズは小さくなるが、HSC-12の裏面の膨らみ高さは表1に示すように実験挙動に類似する結果となる。

コンクリートの破壊領域の判定は、必ずしも要素の消去された領域に対応していない。コンクリートの圧縮特性は弾塑性モデルで表しているの、塑性ひずみが大きい領域は圧潰して剛性が著しく低下している。更に、主ひずみが大きく発生している領域と合わせて検討することにより圧潰しかつ粒状断片化している領域を推定できると思われる。図7には、塑性ひずみの最大値を0.1として推定破壊領域を示している。

5. 3 種々の条件での鋼板コンクリート強度評価

表1に示した種々の実験条件について、前節での考察を基に解析を行い、条件によらず実験結果と整合性のある破壊条件をパラメータスタディーによ

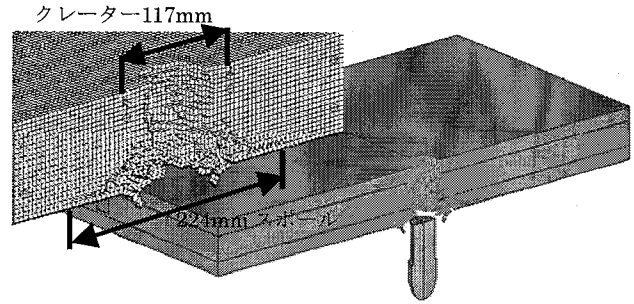


図4. RC-2の解析結果 クレーターおよびスポール破壊を要素消去によって考慮する場合

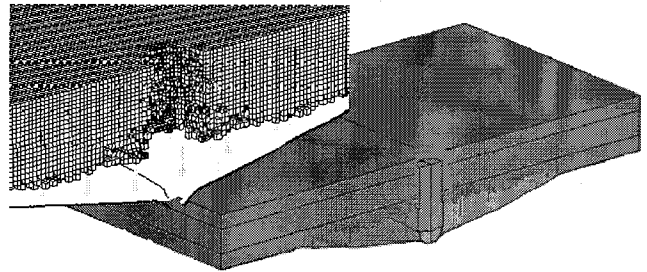


図5. HSC-12解析結果 クレーターおよびスポール破壊を要素消去によって考慮する場合。裏面コンクリートの破壊による要素消去は現実的ではない

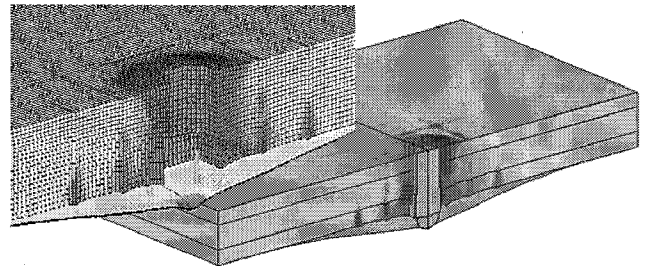


図6. HSC-12解析結果 クレーター破壊のみを要素消去によって考慮する場合。要素消去による破壊の領域は小さくなり、飛翔体は貫通する。塑性ひずみ0.1で要素消去されていない破壊領域(淡黒表示)を表示した。

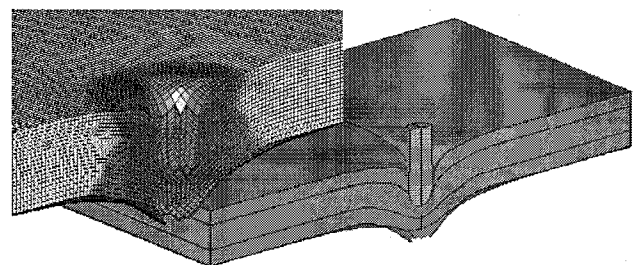


図7. HSC-12解析結果 要素消去せん断ひずみを1.2とする場合。要素消去によるクレーター破壊の領域は小さくなり、飛翔体は貫通せずコンクリートのふくらみと鋼板破壊(裂け)を生じる。塑性ひずみ0.1で圧潰による破壊領域(淡黒表示)を表示した。

り検討した。ただしコンクリートの引張破壊については、破壊は生じるがスポールによる要素消去は生じないとした。

(1) コンクリートの要素消去判定基準

せん断ひずみと主ひずみによる要素消去を検討し、それぞれ 1.2 程度が妥当な判定基準となった。

(2) コンクリートの圧潰後の残留強度

コンクリート強度の 20%~30%を残留強度とする。

(3) 鋼板の破断塑性ひずみ

鋼板の破断は引張状態で生じ、引張塑性ひずみの値を 0.6 とした。ただし、飛翔体頭部とコンクリートの摩擦係数はゼロとする。

上記パラメータスタディーで得られた HSC-6~HSC12 の結果を表 1 に示す。これらの解析結果はいずれのケースも実験結果と非常に良く一致していることがわかる。

その他の検討として、飛翔体を変形体とする場合の結果への影響は小さいこと、コンクリートと鋼板の完全付着は鋼板コンクリートの過剰強度評価につながることで、飛翔体とコンクリートの摩擦係数は大きく結果に影響することがわかった。

5. 4 柔飛翔体に対する衝撃強度解析

前節までに検討した結果を図 2 (b)に示す柔飛翔体に対しても同様に適応し衝撃解析を実施した。

柔飛翔体は弾塑性モデルとし、静的座屈の荷重特性は図 8 に示すように実験結果とほぼ一致している。この飛翔体を試験体 HSC-D2 および HSC-D5 に衝突させた結果を表 1 に示す。図 9 は HSC-D5 の鋼板コンクリート破壊の様子を示す。

6. まとめ

鋼板コンクリートの高速飛翔体に対する強度評価は、実規模での実験は容易ではない。スケールモデルによる実験結果と整合性のある解析条件について検討し、シミュレーションによる実規模モデルの強

度評価に適用するための有用な結果を得ることができたと考えている。

参考文献

- 1) 小島功他、高速飛翔体の衝突に対する鋼板コンクリート版の局所破壊に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)2004年8月、(近畿)2005年9月
- 2) LS-DYNA User's Manual ver. 970, Livermore Software Technology Corporation, 1970
- 3) 藤掛一典他、ひずみ速度効果を考慮した三軸応力下におけるコンクリートの直交異方性構成モデルの定式化、土木学会論文集 No.669/V-50, 2001
- 4) 丹羽一邦他、鉄筋コンクリート版の衝撃爆破破壊シミュレーション、第7回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、(2004年11月)

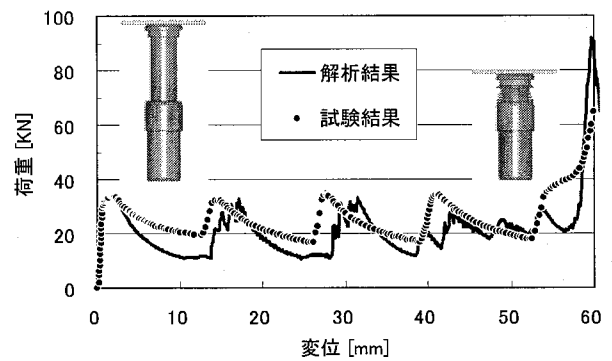


図 8. 柔飛翔体の静的座屈特性 圧縮荷重と座屈変位の関係の試験と解析結果の比較

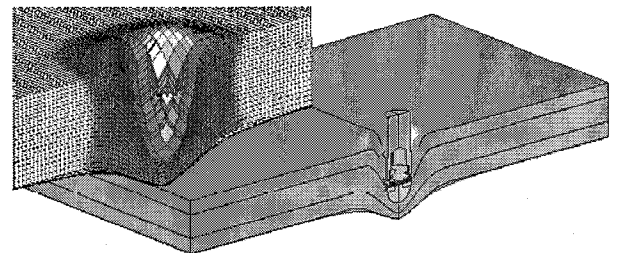


図 9. 柔飛翔体による鋼板コンクリートの破壊 コンクリートの塑性ひずみ 0.1 の領域 (淡黒表示) を表示

表 1. 飛翔体衝突に対する鋼板コンクリート強度評価の実験条件・実験結果・解析結果

実験条件				実験結果			解析結果		
試験体名称	飛翔体	裏面鋼板厚 mm	衝突速度 m/s	破壊モード	膨らみ高さ mm	破砕直径 mm 表面(裏面)	破壊モード	膨らみ高さ mm	破砕直径 mm 表面(裏面)
RC-2	剛	—	175	貫通	—	130 (226)	貫通	—	117(224)
HSC-6	剛	1.2	175	膨らみ	18.5	124	膨らみ	21.0	110
HSC-9	剛	0.8	215	膨らみ	43.5	143	膨らみ	48.4	143
HSC-10	剛	1.2	215	膨らみ	34.2	146	膨らみ	38.9	140
HSC-11	剛	0.8	250	貫通	—	168	貫通	—	143
HSC-12	剛	1.2	250	鋼板裂け	(53.8)	154	鋼板裂け	(53.2)	153
HSC-D-2	柔	0.5	245	貫通	—	143	貫通	—	126
HSC-D-5	柔	0.8	245	膨らみ	43.8	135	膨らみ	53.9	143