

## リアリスティックシミュレーション が兵士の安全性向上に貢献

Picatinny Arsenal は Abaqus を用いて爆風にさらされる装甲車両の解析と強度を改善



戦闘車両の上部に搭載された射撃手保護キット

**陸**軍のミッションと言えば、我々は普通、装甲車両に乗って戦闘地帯をパトロールする兵士の姿などを思い浮かべます。米国ニュージャージー州の陸軍施設 Picatinny Arsenal に本部を置く陸軍兵器研究開発技術センター (ARDEC) に、戦地の作戦行動に劣らず重要な後方支援ミッションがあります。それは、兵士が安全に基地へ戻るために必要な装甲車両の防護具の解析と試験です。

Picatinny における ARDEC の兵器研究の歴史は 100 年前に遡ります。そして同センターは、高度な専門知識と膨大な量の試験データを蓄積していることから、しばしば防護具などの設計評価を任せられます。

そのようなプロジェクトの 1 つに、ハンビー (HMMWV: 高機動多目的装輪車) 用の射撃手保護キット (OGPK) の付属頭上カバーに対する構造評価がありました。2007 年の「Army Greatest Invention Award (陸軍発明大賞)」を受賞した OGPK は、戦闘用装甲車両の上部に搭載される強化防弾ガラス付きの銃塔防護システムであり、射撃手の視界を確保しつつ、小型武器による発砲や爆発から全周を保護します。ARDEC のミッションは、この頭上カバーが爆風荷重にさらされたとき、その防護能力を有効に発揮することの確認でした。

彼らがこうしたミッションを遂行するために保有する最適なツールの 1 つは有限要素解析 (FEA) ソフトウェアです。すでに彼らは FEA を広範に活用していましたが、今回 Picatinny のエンジニアが考えたのは、ハンビー上面からの反射によって OGPK に斜めにぶつかる爆風など、衝撃の相互作用を考慮することでシミュレーション精度を大幅に向上させるための方策でした。

### シミュレーション精度の達成

これまで ARDEC のエンジニアは、SIMULIA の Abaqus/Explicit ソフトウェアを用いて、特定の爆風荷重のシミュレーションに対し、簡略化した爆発パラメータを用いて手作業で 3 次元モデルに圧力荷重を適用するという構造解析の標準プロセスを確立していました。

さまざまなシミュレーション手法を検討した後、Picatinny のエンジニアは新しい手法を試してみようと決断しました。それは Abaqus FEA ソフトウェアの連成オイラー-ラグランジュ (CEL) 機能を用いた爆風荷重の解析でした。CEL 解析では、流体または気体 (オイラー領域) と構造体 (ラグランジュ領域) の相互作用のシミュレーションが可能です。今回、爆風荷重を受ける構造体は空気で囲まれています。爆風源は、空気領域の吸入口となる位置に境界条件として定義されます。その結果、爆風圧がオイラー領域内を伝搬し、吸入口から少し離れた

位置にあるラグランジュ構造に相互作用を及ぼします。

### 解析手法の事前検証

実スケールの爆風荷重解析を試みる前に、Picatinny のエンジニアは Abaqus の CEL 法の性能を検証しました。そのため彼らが行ったのは、衝撃波が空気 (オイラー) 領域を伝搬するとき、ソフトウェアによって衝撃波の強度の低下がリアルに表現されること、および、ラグランジュモデルに対して垂直反射と斜め反射が正しく再現されることの確認でした。

**垂直反射のシミュレーション:** この検証は簡単な FEA 1 次元領域の CEL モデルを用いて行われました。このモデルは、衝撃波を利用して気体の性質などを調べるための実験装置である衝撃波管を模擬しています。衝撃波管問題では、圧縮性流れに対する解析的な方程式が与えられているため、容易に結果の検証が可能です。衝撃波管は 2 つの部分で構成されています。1 つは初期状態において高压ガスが充填されている高压室であり、もう 1 つは大気圧の室温空気で満たされた低压室です。解析は、2 つの区画を仕切る隔膜が破裂した直後の状態からスタートします。高压ガスが膨張して低压側に流れ込むと、平面衝撃波が発生し低压室内に伝播していきます。そして衝撃波が低压室の端部境界面に達すると、反射波が形成されます。この垂直反射した圧力波の背後の圧力を理論解と比較することで、CEL 法のコードが圧縮性流れを適切に取り扱っているかどうかを判定します。結果として、衝撃波管モデルと理論解の間で素晴らしい相関性が認められました。

**球状膨張:** この検証解析では、球状膨張を考慮するため、球体を 1 次元化した CEL モデルが用いられました。オイラー領域には、周辺の温度と圧力に等しい空気材料が割り当てられました。領域の端部 (球の中心) で爆発荷重を発生させると、オイラー領域内に伝播します。この荷重は速度境界条件によって定義されました。大きさは三角波形で与えられ、ピーク値は爆風の初期粒子速度に相当しています。実験データが示した通り、衝撃波の大きさは指数関数的に減衰し、持続時間は長くなり、速度は爆発源から離れるにつれて低下しました。

このシミュレーションでは、最終解析モデルにおいて重要となるメッシュ細分化の検討も行われました。衝撃波問題ではメッシュサイズが特に重要です。解の精度を最大限に高めるには非常に細かいメッシュが必要ですが、一方で計算時間は増大します。

**斜め反射のシミュレーション:** 1 次元 CEL モデルで計算された圧力減衰を TNT 爆破実験から得られたデータと比較した結果、球状膨張する爆風の正確なモデリングが、高精度な解析結果を得る上で重要なファクターであることが判明しました。彼らの考えた手順を実問題に応用するには、そのモデル化アプローチを

付属頭上カバーと射撃手保護キットを表示

1次元から3次元に拡張して検証する必要があります。

そのため解析者は、オイラー（空気）領域として球体の3次元モデルを作成し、ラグランジュ構造として、その中央に45度傾斜したプレートを設置しました。爆風荷重には1次元 CELモデルと同じ速度境界条件が用いられ、同様に領域の吸入口に定義されました。ただし今回は2種類の解析結果があります。それらは、プレート表面でのピーク反射圧力と、吸入口から等距離にある空気中の入射圧力です。これらの圧力の比を、入射角と反射圧力の関係を示した実験結果のグラフと比較した結果、良好な相関性が得られました。

以上で、より詳細な3次元 CEL解析を実行する準備が整いました。

### CEL 解析

解析の構造部分（OGPK 構造と、ハンビー上部の形状および傾斜を表す剛体部分）がラグランジュコンポーネントとしてモデル化されました。OGPK の装甲パネルとブラケットの大部分は8節点連続体シェル要素 SC8R でメッシュ分割され、残りのブラケットと窓は8節点六面体ソリッド要素 C3D8R でメッシュ分割されました。ボルト継ぎ手部分には、構造体が適切かつ確実に拘束され、すべてのボルト力をモニターできるようにするためコネクタ要素が用いられました。ハンビー上部の取り付けブラケットは、2直線近似の弾塑性材料でモデル化され、装甲パネルは、塑性と損傷の両方をとらえるため Johnson-Cook 材料でモデル化されました。また、この基礎的な解析では、一般接触条件を用いて装甲パネルとブラケットとの間の接触相互作用が定義されました。

オイラー領域は、爆風の媒体である構造体周りの空気を表しています。この領域は球体の一部を切り出すことでモデル化されました。また、精度を維持しながら計算時間を短縮するため、オイラー領域ではバイアスメッシュが用いられました。ラグランジュ構造付近の重要な領域のメッシュは、初期の爆風伝播方向に沿って0.25インチ厚の要素で、その他の領域は1インチ厚の要素で構成されています。このようなテクニックを用いることで要素数を削減できましたが、オイラー領域だけでも合計260万要素という比較的大規模なモデルとなりました。爆風は、前回のシミュレーションと同一の境界条件を用いて定義されています。

### リアリティシミュレーションが今後の方針を導く

計算された装甲パネルのたわみ量が、爆風を受ける面に簡易的な圧力荷重を適用した以前の解析結果と比較されました。結果は全体的に好ましいものでしたが、CEL解析の方が以前の解析よりも現実的な結果を示していました。



CEL解析は、特定の装甲車両が爆風荷重に対して示す挙動を理解する上で有用なことから、Picatinny は、新型装甲車両の設計段階で利用価値があるだろうと期待しています。同様の解析法は、爆発実験設備や高リスク（戦闘）地域にある建物など、爆風荷重を受ける可能性があるどのような構造体にも適用できます。

CEL法を用いることの利点の1つは、Abaqusが衝撃相互作用のすべてを自動で実行することであり、解析者は、各傾斜面の正しい反射圧を得るために、表面相互作用ごとに入射角を計算する必要がありません。（手作業に代わる新たな方法は、SIMULIAが先ごろAbaqusに追加したConWepソフトウェアの中にもあります。これは爆風モデルの正確な距離と入射角を計算し、適切な圧力荷重を自動で割り当てます。）CELのもう1つの重要な特徴は、ラグランジュ構造をオイラー領域内で簡単に再配置して、必要な任意入射角の検討を行える点です。

ARDECのエンジニアは、爆風荷重のモデリングにCEL法を用いることで、貴重な知見やリアルな結果がもたらされる点には大いに期待できると結論付けています。また、以前の簡易的な手法では正確な解析が不可能であった非常に複雑な形状も解析が可能になります。ARDECは引き続きAbaqusおよびCELを調査し、この新手法を徹底的に検証する予定です。その結果、最終的に予測解析に利用できるようになるかも知れません。

詳細は以下をご覧ください  
[www.pica.army.mil](http://www.pica.army.mil)  
[www.simulia.com/cust\\_ref](http://www.simulia.com/cust_ref)