

技術論文・解説

落下物保護構造物(FOPS)のシミュレーションの紹介

Introduction of Simulation of Falling Object Protective Structures

金 田 修 一
Shuuichi Kaneda

玉 川 知 樹
Tomoki Tamagawa

建設機械オペレータの安全性確保のため、ISOなどで安全規格が制定されている。ここでは、それらのうちのひとつである、建設機械キャブ天井上空からの落下物が衝突した際のシミュレーションソフトウェア「PAM-CRASH(パムクラッシュ)」を紹介する。

With the aim of securing the safety of construction machine operators, various safety standards have been established by ISO, etc. This paper describes PAM-CRASH which is a computer program for simulating the fall of an object onto the cab roof of a construction machine from above.

Key Word: FOPS, CAE, PAM-CRASH, Collision Analysis, Safety Standards.

1. はじめに

建設機械のオペレータは通常、密閉された箱状空間(キャブ)内のシートに座り、操作を行う。油圧ショベルなどでは、その作業機を伸ばし、キャブよりも上方にある高所の掘削作業を行なう際、土砂・岩などがキャブに落下することがある。このため、オペレータを適切に保護する目的で構造物(Falling Object Protective Structures: 以下FOPSという)を装着する。これらFOPSには、実際の使われ方に基づいて一定の強度基準が定められている。本稿では保護構造物がこれらの規格を満たした設計になっているかをコンピュータ上でシミュレーションできるソフトウェア「PAM-CRASH」を実例とともに紹介する。

2. FOPSの安全規格

FOPSに要求されている安全規格はISO 3449-1992やSAE J231に規定されている。これらを要約すると、規定形状・規定質量のウェイト(落下物)を規定高さから自由落下させ(図1参照)、天井部に衝突した後に衝突部がDLV(Deflection Limiting volume: たわみ限界領域 図2参照)まで変形が及ばないこと、というものである。

コマツの油圧ショベル・ブルドーザのFOPS試験においてもこれら安全規格にのっとり、落下物が衝突した際に、衝突部が変形してもDLVに侵入しないことを確認している。

図2がDLVである。これはオペレータがシートに座った状態をやや大きめに簡素にかたどったような領域であり、この人間相当の領域まで変形が及んではならない、という規格の判定ラインとなる。ISO 3164にはこのDLVの寸法も規定されている。



図1 FOPS性能試験

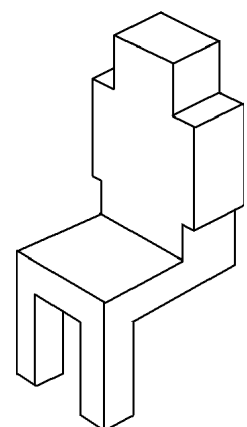


図2 DLV(たわみ限界領域)

3. 落下物保護構造物(FOPS)

まず、キャブ本体があり、そのオプションとして支柱式の板金構造物をFOPSとして車体へ装着するもの(図3参照)のほか、キャブ天井天窓部に装着してFOPSとするもの(図4参照)など車体の仕様(および対応する安全規格)に応じたFOPSがある。

これらはキャブ内のオペレータが天窓から上方が見えるよう、構成板がスリット状に並んでいる。

また、前述のようにISOなどで安全規格が厳密に制定されたことからオプションでFOPSを装着する頻度が増えたため、後付けオプションではなく、最初からキャブそのものにFOPS機能を持たせた、通称FOPSキャブもある。

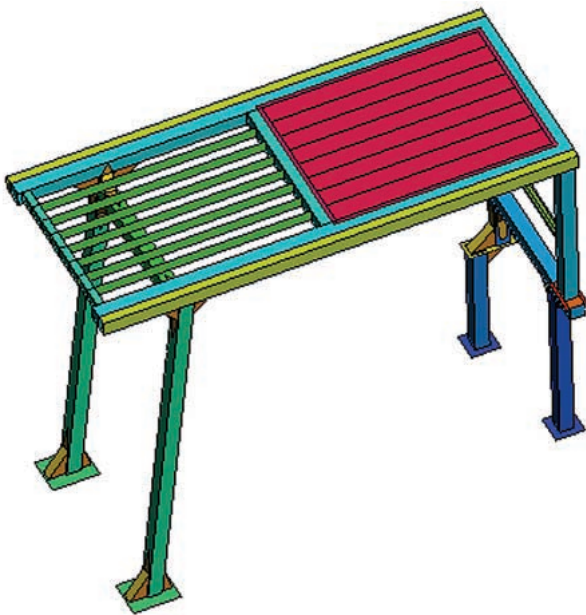


図3 FOPS(キャブ天井全体を覆うタイプ)

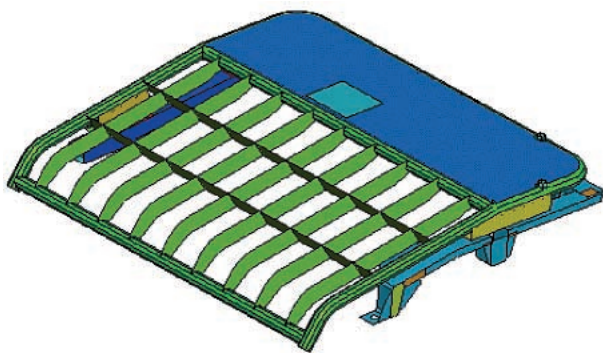


図4 FOPS(キャブ天窓部だけを覆うタイプ)

4. 開発時の問題点

これらFOPSは当然落下物が衝突した状態を想定して衝突部の変形量を設計するのだが、手計算では完全弾性体による静的荷重を基準に衝撃荷重時の変形量を算出するようなやり方しかないため、実測値とは一致しにくく、経験則的に設計していた。このため、実機FOPS試験を実施するまではどの程度の強度レベルなのか把握できず、最悪、実機にて繰り返し試験をすることになり、費用・工数の面で有効とは言えない。実際はそれほど実機でのトライ&エラーを繰り返していたわけではないが、図面段階での設計品質には自信がなかった、というところである。

そこで、CAEでコンピュータシミュレーションにてFOPSに落下物を本当に衝突させられないか模索し、この目的に合致したソフトウェア、落下・衝突時以降の接触により部材にかかる荷重が刻一刻と変化し、かつ弾塑性変形・破断まで実現できるソフトウェア「PAM-CRASH」を使ってみることにした。

5. PAM-CRASH 紹介

ここではPAM-CRASHの機能について簡単に説明する。本稿ではFOPSのシミュレーション(以下では単純に計算、という)に特化した紹介になるが、もちろん以下に述べた以外の機能もある。

5-1. 細かい機械的性質を定義できる

素材がもつ応力-ひずみ線図そのものを定義する。実測値では複雑な線を描くが、PAM-CRASHではこれを最大8本の直線(弾性域で1本、塑性域で7本の計8本)で表現できる。最大塑性ひずみを定義すれば破断させることも可能。

5-2. 接触定義が容易

他の接触問題を解くことができるソフトウェアでは事前に当たる位置を決めておく(および接触させるための何らかの下ごしらえをする)ことが多いが、PAM-CRASHでは接触するであろう部材のリストアップ程度ですむ。この(材料特性をもった)部材とこの(材料特性をもった)部材が接触すると考えたのなら、それら接触する組み合わせを材料特性ごとに別れたグループで定義すればよく、非常に楽である。

5-3. 時刻歴計算をする

FOPS計算の場合、落下物と天井構成部の隙間1mm程度を初期状態とした衝突直前から衝突後に落下物がバウンドなどし、天井構成板の変形が落ち着くまでの約0.05秒間のシミュレーションをすることになる。この解析者が任意に設定したシミュレーション時間を小刻みにタイムステップを区切って計算する。ただ、時刻歴計算しかできず、静解析のように、いきなり定常状態を計算することはできない。

6. 実 例

6-1. 計算モデル例 (FOPS キャブの場合)

図5は大型ブルドーザのキャブの3D-CADモデルであり、この3D-CADモデルから計算用モデルを作成する。図5の断面位置から上のみを計算モデル化し、下は省略する(FOPSの計算において、衝突はあまりに瞬間的・局部的なので、下部の有無での結果はほとんど差異はないことを確認している)。下部だけでなくFOPS機能に直接強度関与しない部材(窓ガラスなど)も省略する。

図6が計算モデル用キャブであり、この内部(内装側)は図7のようになっている。スピーカ取り付け穴やリヤワイパモータ取り付け穴部で構成板一部を穴加工などで無くし

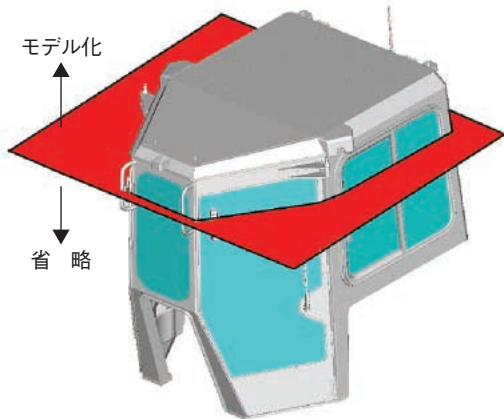


図5 FOPSキャブ3D-CADモデル

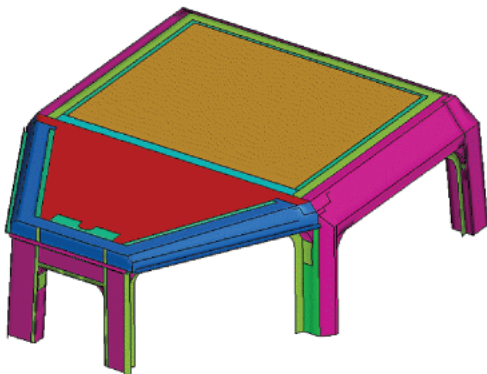


図6 FOPSキャブ計算モデル

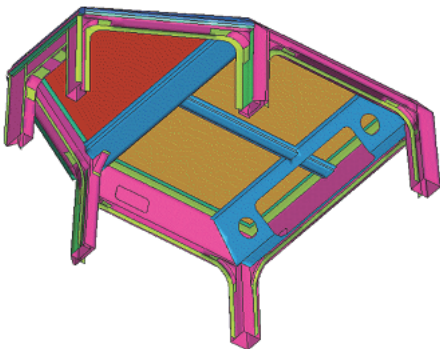


図7 FOPSキャブ計算モデル内装側

ている分強度が落ち、衝突による大変形を生じることも十分考えられるため、それら要因もモデル化しておく。

図8は落下物のモデルである、落下物もこのようにそのままモデル化する。この落下物の形状・質量はISO-3449-1992に規定されている。

計算初期状態では図9のように落下物をFOPSとの接触直前の位置に配置している。図1のように、ISO規格通りの規定高さから自由落下させると、落下開始から衝突までは接触すらしていないので計算モデル上では省略し、衝突直前の落下速度を落下物に与え、衝突させる。

次に、FOPSを構成する部材の機械的性質を定義する。鋼材メーカーなどのミルシートなどから、下の図10のような応力-ひずみ線図を決定する。



図8 落下物計算モデル

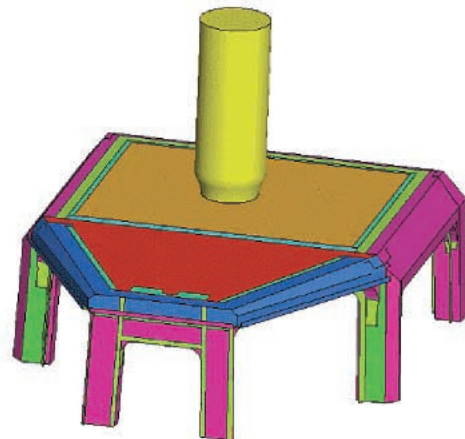


図9 計算モデル(初期状態)

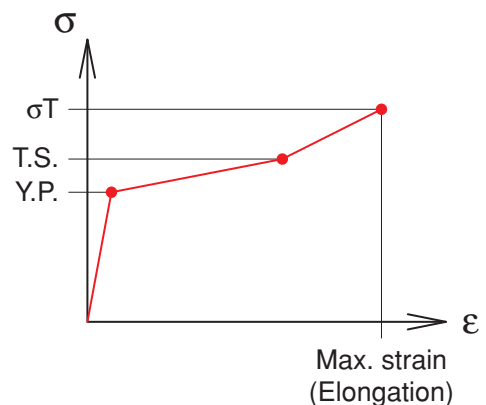


図10 計算モデル用応力-ひずみ線図

ここでは、破断までを3本の直線で定義した応力-ひずみ線図で計算している。降伏点Y.P.まで弾性変形し、降伏点Y.P.を超えてから引張強さT.S.まで塑性変形、その後も塑性変形を続け、真破断応力 σ_T で破断する。これら機械的性質の妥当性については、FOPS試験の実測値との照合で判断することになる(ここでの照合例は後述7項参照)。

6-2. 計算結果例(FOPS キャブの場合)

前項6-1にて作成したモデルを計算すると、図11、図12のような衝突変形図(およびアニメーション)を見ることができ、ここから最大変位となった点の変位を時系列で見ることができる(図13)。

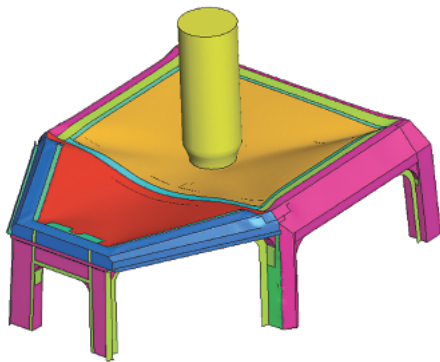


図11 変形図(最大変位時)

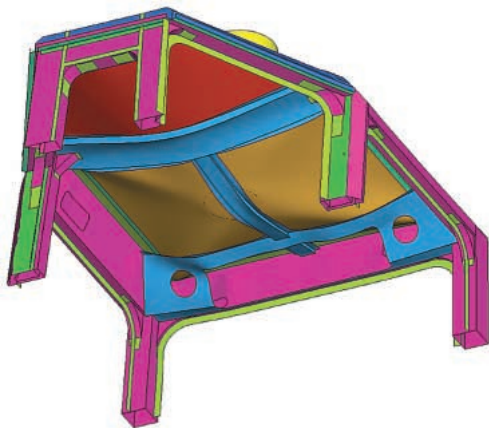


図12 変形図内装側(最大変位時)

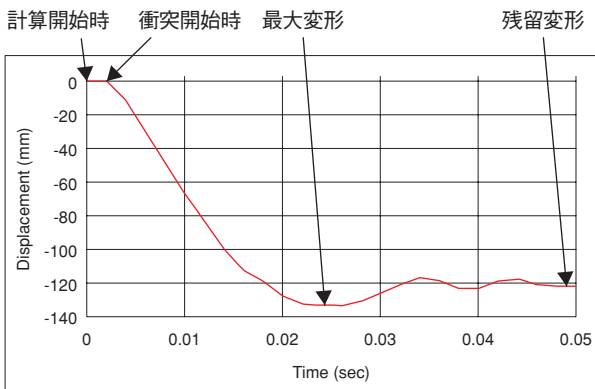


図13 変位時系列グラフ(最大変位位置)

図13は横軸時間(sec), 縦軸を落下方向の変位(mm)をプロットしたものである。衝突後約0.025秒後に最大変形133mmとなることが分かる。この計算での変位がDLVと天井衝突部との初期スキマ以下になるように設計すればよい。このように計算で最大変位を知ることは非常に有効である。

7. 実測値との照合

計算がどの程度信頼できるのかを知るために、実測値との照合をとる。ここでは、計算を行ったFOPS3種類を照合する。

FOPS形式	最大変位(mm)		残留変位(mm)	
	実測	計算	実測	計算
PC400-6 ※1	— ※4	65	18	20
PC228US-3 ※2	— ※4	37	26	26.5
D475A-5 ※3	130	133	105	121

(※1)PC400-6

FOPS ISO 3449-1992 規定のレベルII(229kg円柱を5.2m上空から自然落下させ、変形がDLVに浸入しないこと)を計算・実機ともに満足した。

(※2)PC228US-3

労働安全衛生規則 第153条「支柱式ヘッドガード」規定(38.2kg・直径30cm以下の鋼球を自然落下させたときに破断なきこと、50mm以上の残留たわみがないこと)を計算・実機ともに満足した。

(※3)D475A-5

これも※1と同じくISOレベルIIを計算・実機ともに満足した。また、この実機試験では非接触型変位センサをDLVに取り付け、計算と同じような時系列変位を測定したので、それもあわせて図14に示す。

(※4)試験合否が焦点のため実測データはない。

実測値が0~0.01秒あたりまで一定値なのは、変形している天井がセンサ測定範囲外にある(天井が落ちてきて測定可能範囲に入れば初めて測定できる)ため。グラフより、実測・計算ともに最大変位の時間・変位量ともよく合致している。

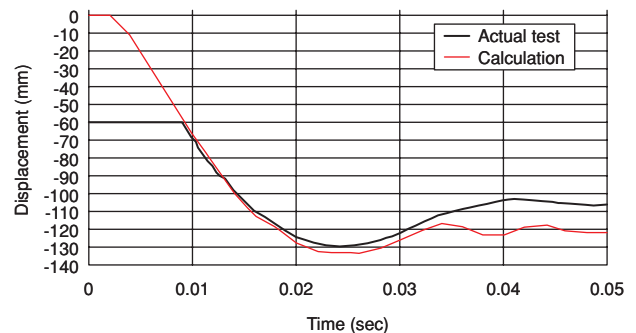


図14 D475A-5 実測・計算の変位比較

8. その他の計算例

8-1. FOPS 実機試験不合格品の再現

ブルドーザFOPSキャブの天井後方内装側のリヤワイパモータ取り付け穴での大変形の再現(図15)。

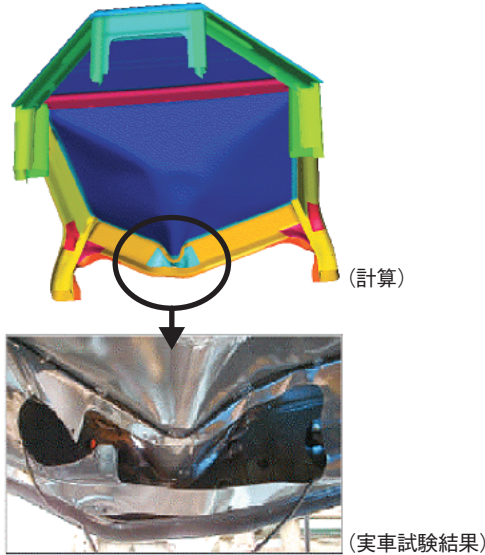
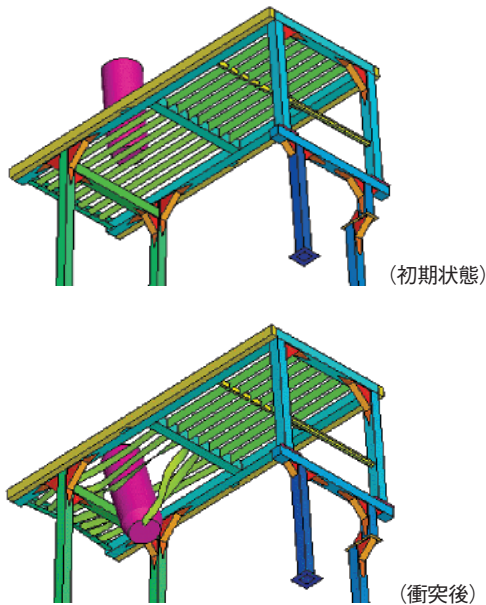


図15 FOPS実機試験不合格品の再現

8-2. 破断の例

ISOレベルI (46kg 鋼球を3 m上空から自然落下でDLV 浸入なきこと)適合のガードにレベルII (228kgを5.2mから落下)条件で計算した場合(図16)。



(オペレータ席から天井を見上げたアングル)

スリット状に並んだ板の一枚をねじり切って横のスリット板を押し広げながらすり抜けてくる。

図16 破断の例

9. 今後の予定

FOPSに関しては十分実用的であることは確認できた。今後もこれらは継続的に解析し、実測との照合を重ね、より精度とともに信頼性を上げていくことはもちろんのこと、建設機械の車体転倒シミュレーションなどにも適用していきたい。

著者紹介



Shuuichi Kaneda

かね だ しゅういち

金田修一 1976年、コマツ入社。

現在、コマツ 開発本部 建機第一開発センター所属。



Tomoki Tamagawa

たま がわ とも き

玉川知樹 1994年、コマツ入社。

現在、コマツ 開発本部 建機第一開発センター所属。

【筆者からひと言】

計算のやり方もさることながら、実測値との照合に苦労した。天井板の最大変位とその時刻を測るの必要があり、試験部門の協力が得られたことは有難いことだった。このシミュレーションのリードタイムは約1~2週間も要するので、通常のFEMのように多くの案を計算する訳にはいかない。したがって、今後は実機試験合格の確度を上げるために、シミュレーション以前の構想・計画段階で、ある程度の判定ができる設計指標を作ってゆきたい。

【注記】

「PAM-CRASH」はPAM System International S.A.の登録商標です。