

衝突に伴う横跳ね現象の数値解析上の留意点について

東電設計(株) (広島大学) フェロー会員 ○中村 秀治

1. はじめに

剥離，支圧，滑りなどの接触問題を伴う衝突解析は，非線形性の強さが故に収束解が得づらく，解析技術の進歩した今日においても難易度の高い解析の一つである．実現現象に即した解析の難しさは，非線形解析の複雑さと共に，解析で使用する各種物性値や定数にある．衝突問題は再現実験による確認ができないので，有用な計測値の入手は不可能である．従って，理論解析手法を組み込んだ解析プログラムが開発されたとしても，衝突現象の解明を図るためには，最適な物性値等を設定するための，実験に代わる入念な検討が必要になる．

ここでは解析に用いる物性値等により現象自体が変わる一例として，垂直に落下する水平円盤が，剛盤上に偏心配置された立方体に衝突する問題を考える．立方体は落下物との衝突時の位置関係次第で，予期せぬ力を得て水平に飛び出し(ここでは，“横跳ね現象”と呼ぶ)，物性値等の条件次第で多様に変化する様子を示す．

2. 衝突解析方法と解析モデルの形状

FEM 衝突解析は自動車業界など，主に機械系の分野で検討事例が報告されている．一方，土木分野においては橋梁の桁衝突，巨礫や落石による構造物被害に関する研究報告がなされている¹⁾．これら既往研究と本報告との違いは，衝突による損傷・変形よりも衝突された物体の予期せぬ横跳ね現象に着目している点である．

解析理論的には，(i) 幾何学的非線形，(ii) 材料非線形，(iii) 接触問題，(iv) 要素の発生・消滅などの機能を用いた非線形動的応答解析であるため，解析者自らによるコード作成は現実的でなく，必要な機能を備え信頼性の高い解析コードを利用することになる．ここでは，ADINA ver.9.6 を用いるものとした^{2),3)}．

解析モデルの材料は鋼材を想定し，形状と配置は図-1 に示した通りである．特定の構造物を対象としていないが，解析上用いた寸法は，円盤(外径 260×厚さ 50(mm))．立方体(一辺 120(mm)) である．

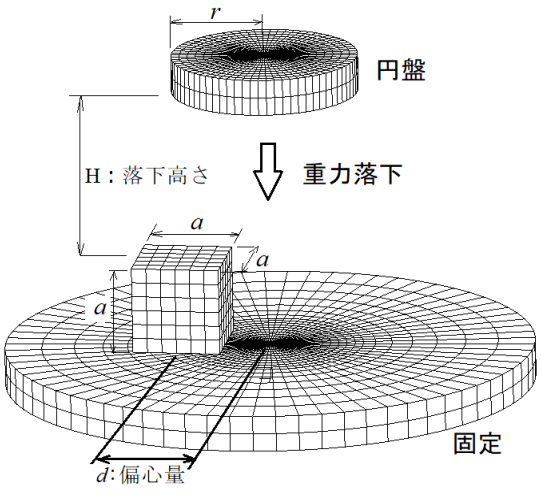


図-1 重力落下する円盤と衝突する立方体

3. 解析条件と解析ケース

解析においては，a) 円盤の落下高さ(H)，b) 立方体と円盤の偏心量(d)，c) 円盤と立方体間の滑り摩擦係数(k)，d) 減衰定数(ξ)等をパラメータとし，解析ケースは表-1 に示すパラメータの組み合わせとした．

時間刻み Δt=0.005(sec.)，1000 ステップでトータルの解析時間は 5.0 (sec.)とした．

表-1 解析ケース (a：立方体の辺長)

解析ケース	立方体と円盤の偏心量(d)	円盤の落下高さ(H)	滑り摩擦係数(k)	減衰定数(ξ)
1	0.	a	0.00	0.00
2	0.	2a	0.20	0.01
3	a/2.	a	0.00	0.01
4	a/2.	a	0.10	0.01
5	a/2.	a	0.20	0.01
6	a/2.	2a	0.00	0.01
7	a/2.	2a	0.10	0.01
8	a/2.	2a	0.20	0.01
9	a	a	0.00	0.01
10	a	2a	0.20	0.02

キーワード FEM 衝突解析，接触問題，横跳ね現象，幾何学的非線形，材料非線形
連絡先 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12 (KDX 豊洲グランスクエア) 東電設計(株) TEL.03-6372-5720

4. 解析結果

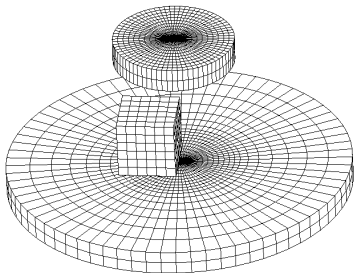
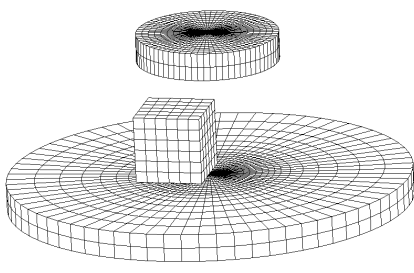
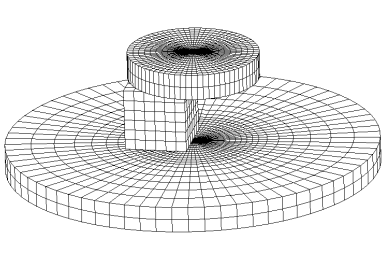
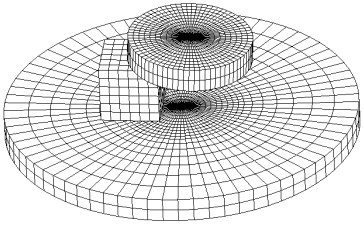
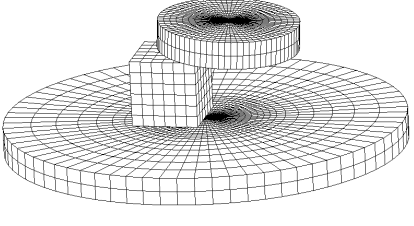
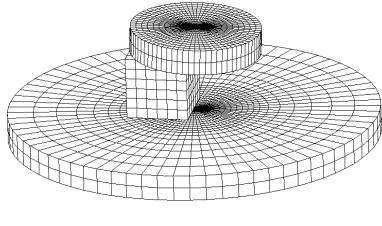
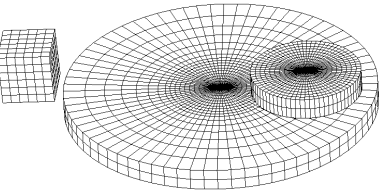
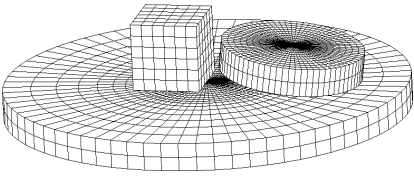
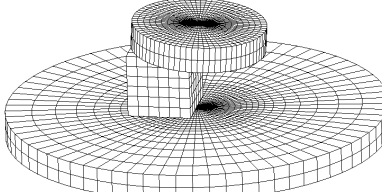
表-1 に示した解析ケース 1～10 に対する結果の概要は表-2 に記した通りである。

解析結果の考察から言えることは、わずかな条件の違いが、衝突後の挙動に大きく影響することであり、一例として、滑り摩擦係数を $k=0.0, 0.1, 0.2$ とした場合、100, 200, 400 ステップ計算後における状況を表-3 に示した。様相が異なっていることがわかる。

表-2 解析による横跳ね結果のまとめ

解析 ケース	立方体の横跳ね 発生の有無	最終状態
1	無し	円盤は立方体上で不安定な動き
2	無し	円盤は立方体上に残った。
3	有	円盤は下に落ち、立方体は横跳ねた
4	無し	円盤は下に落ち、立方体はそのまま
5	無し	円盤は立方体上に残った。
6	有	円盤は下に落ち、立方体は横跳ねた
7	無し	円盤は下に落ち、立方体はそのまま
8	無し	円盤は立方体上に残った。
9	有	円盤は下に落ち、立方体は横跳ねた
10	無し	円盤は下に落ち、立方体はそのまま

表-3 衝突後の立方体の横跳ね挙動（立方体と円盤の偏心量 $d=a/2$ ，円盤の落下高さ $H=2a$ ）

	ケース 6	ケース 7	ケース 8
	$k=0.00 \quad \xi=0.01$	$k=0.10 \quad \xi=0.01$	$k=0.20 \quad \xi=0.01$
100 ステップ 0.5 (sec.)			
200 ステップ 1.0 (sec.)			
400 ステップ 2.0 (sec.)			

5. 結 び

衝突は発生自体が稀であり、再現実験も容易に実施できないため、解析的検討の対象に上がることが殆どなく、実行可能か否かも判然としない場合が多いと思われる。本報告では、衝突により予期せぬ横跳ねを生じる問題を取り上げ、互いの位置関係の他、滑り摩擦係数、減衰定数などの影響を検討した。結果として、(i) 解析モデルの設定、(ii) 解析コードの選択、(iii) 非線形解析に用いる物性値、定数の選定を入念に行うことに因り、実感覚に近い解の得られることが明らかになった。今後、実現現象の予測や再現に活用する上で精度向上は必須であり、前記(i), (ii), (iii)の更なる検討が求められるであろう。なお、陽解法や陰解法の時間積分アルゴリズム⁴⁾は種々あるが、解析コードに埋込まれており、その選択を解析者に求められることはないと思われる。

参考文献

1) 土木学会，耐爆・耐衝撃設計法に関する調査研究小委員会：爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価－希少事象に備える－，構造工学シリーズ 27, 2017.9.
2) Bathe, K. J.: Finite Element Procedures, Prentice-Hall, 2006.
3) ADINA R&D, Inc.: ADINA Theory and Modeling Guide, 7.4 Non-linear dynamic analysis, 2011.
4) 戸川隼人：微分方程式の数値計算－有限要素法と差分法－，オーム社，1973.