

## 16. 衝撃問題

とりまとめ：大野友則 (防衛大学校)

論文題目：“環境温度と速度効果を考慮したゴム製防舷材の解析手法に関する研究”

著者：下菌征史，園田佳巨，西本安志

掲載：Vol.54A, pp.979~988, 2008 年 3 月

◆討議[①別府万寿博 (防衛大)，②岸 徳光 (室蘭工業大)，③森 雅美 (防衛大) ]

## ◇①の質問

- (1) 環境温度と速度効果は連成しないのでしょうか？  
 (2) Mooney-Divlin 式での除荷の取り扱いについて教えてください。

## ◆①の回答：

- (1) 本研究で用いた構成則では、温度効果と速度効果は互いに独立し、非連成な関係であると仮定しております。  
 (2) 本研究では、ゴムの粘性やヒステリシスによるエネルギーの吸収を考慮しておらず、あくまでも衝撃反力がピークを示すまでの挙動をシミュレートすることに主眼を置いております。そのため、載荷と除荷で同じ Mooney-Rivlin 式を用いて計算を行っております。

◇②の質問：温度が変化した場合のゴムの履歴特性について教えてください。

## ◆②の回答：

本研究では、防舷材が衝撃荷重を受け、変形が進行する過程の温度変化は考慮しておらず、周囲環境と同一の一定値と仮定しております。そのため、載荷と除荷では、同じ環境温度に対する材料特性を用い計算を行いました。

◇③の質問：解析は大変形を考慮して行われていますが、ひずみは公称ひずみが定義されています。大変形解析では、ひずみは対数ひずみで定義するのが一般的です。公称ひずみを用いた理由について説明して下さい。

## ◆③の回答：

本研究では、ゴムの材料試験結果を整理する際にひずみ速度として、載荷速度を試験片の初期長で除した値（公称ひずみに相当）を用いることにしました。そのため、試験と解析の両者で、ひずみ速度が異なる定義とならないよう

に、解析においては、各位置におけるひずみの変化率（ひずみ増分を時間増分で除した値）でなく、試験体全体の平均ひずみの変化率（全ひずみを経過時間で除した値）として、ひずみ速度を定義しました。

論文題目：“剛飛翔体の高速衝突によって生じるコンクリート板の表面破壊に先端形状が及ぼす影響”

著者：三輪幸治，別府万寿博，大野友則

掲載：Vol.54A, pp.989~998, 2008 年 3 月

◆討議[①岸 徳光 (室蘭工業大)，②三上 浩 (三井住友建設)，③安藤智啓 (防衛省技術研究本部)，④園田佳巨 (九州大) ]

◇①の質問：(1) 相対貫入深さのパラメータを用いていますが、貫入量は板厚の影響を受けるということでしょうか？(2) 裏面剥離現象は、衝突した飛翔体の先端形状よりも板厚に依存すると考えられますがいかがでしょうか？

## ◆①の回答：

- (1) 板厚が貫入量の程度に及ぼす影響は本実験の範囲では非常に小さいと考えられます (数 mm 程度)。  
 (2) 板厚が大きいものと小さいものに、同じ先端形状の飛翔体をほぼ同じ速度で衝突させた場合にはご指摘のように、板厚が小さい板ほど裏面剥離が発生しやすいことはこれまでの実験より明らかになっております。今回の実験では、同じ板厚のコンクリート板に同じ速度・質量で先端形状のみが異なる (半球型、円錐型、平坦型) 飛翔体を衝突させた場合 (板厚 7 cm, 速度約 200 m/s) に、円錐および平坦型では裏面剥離が生じなかったものの、半球型では裏面剥離が生じました。したがって、先端形状も裏面剥離現象に影響を与えていることが考えられます。

◇②の質問：(1) 摩擦係数にはひずみ速度効果は考慮されているのでしょうか？(2) 衝撃実験に用いた重錘の質量はいくらでしょうか

## ◆②の回答：

- (1) 摩擦係数にはひずみ速度を考慮しておりません。摩擦係数の値 0.1 は Chen らの研究を参考にしました。  
 (2) 本実験に重錘は用いておりませんが、それに相当します飛翔体は各先端形状とも質量 50 g (飛翔体とともに発

射される支持具は 50g) です。

◇③の質問：(1) コンクリート板表面に生じたクレータの容積は、飛翔体の先端形状によって差異が生じたかどうか教えて下さい。(2) コンクリートのひずみ速度は、実験で計測されたのでしょうか？

◆③の回答：

(1) 本実験の範囲では、表面に生じたクレータの容積に関して顕著な差異は認められませんでした。

(2) 理論モデルに考慮したひずみ速度は、理論モデルの計算による貫入量を実験結果と比較して決めました。なお、同様の実験において計測した板裏面および内部に生じたひずみ～時間関係からひずみ速度を概算しますと、 $10^1\sim 10^2$  (1/s)程度となり、本理論モデルに考慮しましたひずみ速度の範囲と概ね一致しております。

◇④の質問：摩擦の影響が考慮されていますが、その場合にはエネルギー損失があるはずですが、エネルギー保存則を用いた場合の定式化はどうでしょうか？

◆④の回答：

本理論モデルでは、飛翔体の有する運動エネルギーが、1)摩擦による損失分と 2)飛翔体がコンクリートに貫入することによる消費分、のみに用いられると仮定して計算しています。計算終了は、飛翔体の速度が 0 m/s のとき (貫入に消費されるエネルギーがなくなった)、としております。

論文題目：“爆薬要素のモデル化が鉄筋コンクリート構造物の爆発応答特性に与える影響”

著者：安藤智啓

掲載：Vol.54A, pp.999~1010, 2008年3月

◆討議[①森 雅美 (防衛大), ②三輪幸治 (防衛大), ③園田佳巨 (九州大), ④下菌征史 (エムエスシーソフトウェア)]

◇①の質問：解析対象は部材軸方向および奥行方向に対称であるため、解析モデルは対称性を考慮した 1/4 モデルで十分と考えられますが、いかがでしょうか？

◆①の回答：

ご質問のとおり、RC はりに関する本解析につきましては、1/4 モデルで十分です。ただし、今後、爆発位置をスパン長の 1/4 点とした場合の解析等も実施する予定ですので、ここでは対象構造部材全体をモデル化しました。

◇②の質問：(1) 論文中の図 16 において、実験および解

析の時間  $t=0$  はどのようにして決定されたのでしょうか。

(2) 図 16 中の実験によるひずみは、 $t=3\text{ ms}$  で圧縮ひずみが生じています。曲げの影響についての考察のほかに、応力波の影響は考慮しなくてもいいのでしょうか。

◆②の回答：

(1) 本研究におきましては、各波形は圧力波形の立ち上がり時間を 0 ms として整理しました。すなわち、各波形の中で、構造物に作用する圧力波形が最も立ち上がり時間が早いことが予想されたので、この時間を基準 ( $t=0$ ) としました。

(2) RC 部材あるいは RC 構造物が爆発荷重を受ける場合には、部材や構造物の裏面あるいは側面のコンクリートが剥離するスポール破壊現象が生じる場合があります。この現象は、応力波に起因して生じると考えられることから、応力波の影響を検討することは非常に重要であると考えます。ご質問にもありますように、爆発現象において鉄筋コンクリートのひずみ波形を計測しますと、波形の極く初期時刻に高周波成分が励起される場合があります。現段階では、これが応力波に起因して生じるものなのか、何らかのノイズであるのかを明確に説明することが困難です。今後、さらに詳細に解析・検討していきたいと考えています。

◇③の質問：爆発による圧力で空気中に大きな粗密波が発生することを考えると、ラグランジュ要素には過度のゆがみが生じるのは当然です。したがって、爆薬要素として用いるのは適切でないと考えられます。

◆③の回答：

爆薬位置と対象とする構造物との距離 (爆発距離) が比較的大きい場合には、ご指摘のとおり、爆薬をラグランジュ要素でモデル化する場合の解析は実現象の構造物の応答や損傷を精度良くシミュレートできないと考えます。しかしながら、接触爆発あるいは極至近距離での爆発現象の場合には、ラグランジュ要素でモデル化する場合でも爆薬要素が過度に変形する前に爆発荷重が構造物にほとんど作用し終えらるためと考えられますので、比較的精度良く実現象をシミュレートできると考えています。これは、過去に著者らの行った研究においても確認しています。なお、爆薬をラグランジュ要素でモデル化して解析を行う場合のメリットは、オイラー要素でモデル化する場合に比べて解析時間が短くなるという点です。

◇④の質問：オイラー要素を用いた計算結果と実験結果を比較した図で、計算結果が実験結果よりも鈍って示されています。この改善策はあるのでしょうか？

◆④の回答：

RCはりに関する圧力波形において、実験の計測波形は高周波成分を含んだ形の分布性状を示しているのに対して、解析で得られる波形は高周波成分の顕在化していない過減衰的な分布を示します。これは、解析波形が実験波形に比べて鈍いということではなく、単に実験に用いたセンサーの応答性が爆発時の圧力波形を精度良く計測するのに十分に高くなかったためと考えています。なお、後述のRC構造物に関する圧力波形の比較では、実験に用いたセンサーをRCはりの場合より応答性の高いものに変更していますので、実験波形には著しい高周波成分は顕在化せず、実験波形は解析波形と同様な過減衰的な分布性状を呈していることが確認できます。

論文題目：“爆破荷重を受けるAFRPシート接着されたコンクリート版の弾塑性衝撃応答解析手法の妥当性検討”

著者：岸 徳光，大野友則，三上 浩，澤田純之

掲載：Vol.54A, pp.1011～1021, 2008年3月

◆討議[①石丸和宏（明石高専），②藤掛一典（防衛大）]

◇①の質問：解析を行う際、シート厚を10倍、弾性係数を1/10に換算していますが、他の厚さについても同様な検討を行って妥当性に関する検討は行われたのでしょうか？

◆①の回答：

曲げ補強効果のみを期待しておりますので、軸剛性を一定とすることで等価な効果が期待できるものと考え、他の厚さを仮定した場合の検討は行っておりません。

◇②の質問：（1）使用している繊維シートの繊維方向の特性はどのようになっているのでしょうか。（2）要素寸法に応じて引張強度を変化させていますが、ひずみ速度効果として考慮した方が適切ではないかと考えられます。

◆②の回答：

（1）本研究では2方向シートを用いておりますので、簡略化して等方等質材料と仮定し、基本的に本文中の表-3に示されている静的な物性値を用いて解析を行っております。なお、数値解析上のテクニックとして、シート厚を仮想的に厚くする場合には、軸剛性が等価になるように対応して弾性係数を変化させております。

（2）ひずみ速度効果に対応する引張強度の増加は、本文中にも述べておりますように、予備解析を行い  $f = 0.2 f_c$  と仮定しております。一方、本研究ではさらに要素寸法に対応して引張強度も変化させております。この考え方は、本文中でも述べておりますように、異なる要素長に対して

も等しいひずみエネルギー量で一個のひび割れが発生するようにするためです。本研究では、用いた要素長を基準のその1/2にしたことにより、仮定の引張強度を基準強度の $\sqrt{2}$ 倍にしております。

論文題目：“覆土式のRC製火薬庫内で爆発が生じた際の爆風圧特性に及ぼす覆土厚の影響”

著者：別府万寿博，大野友則，塩見昌紀，片山雅英

掲載：Vol.54A, pp.1022～1033, 2008年3月

◆討議[①安藤智啓（防衛省技術研究本部），②園田佳巨（九州大）]

◇①の質問：（1）覆土式火薬庫の場合、前方方向の爆風圧の最大値は自由空間での爆発より大きくなるということでしょうか。（2）爆風圧センサの向きは、爆風が作用する方向と直交または地盤に平行にして設置されているのでしょうか？

◆①の回答：

（1）火薬庫構造では、一般的には入口の後方に住民等が存在するため、今回は主として後方の爆風圧に着目して検討しました。前方での最大爆風圧は、自由空中爆発での爆風圧より大きくなるので、爆風圧を効果的に回折させたり、減衰機構を設ける必要があると考えています。

（2）爆風圧が作用する方向を特定することができないため、爆風圧センサーは地盤に平行に設置しています。

◇②の質問：爆発による覆土の飛散に対する効果はどうなっているのでしょうか。また、解析で考慮されるのでしょうか。

◆②の回答：

爆発のエネルギーの一部は、覆土の飛散による運動エネルギーに変換されると思いますが、解析は覆土の崩れが無いケースに対して行いました。また、解析では覆土は剛体と仮定しましたので、覆土の変形なども考慮しておりません。

論文題目：“矩形RC版の衝撃耐荷挙動に及ぼす重錘直径の影響”

著者：岸徳光，三上 浩，栗橋祐介

掲載：Vol.54A, pp.1034～1043, 2008年3月

◆討議[①藤掛一典（防衛大）②五十嵐 晃（京都大）]

◇①の質問：耐力比が2倍になるということですが、それは材料のひずみ速度効果による影響と考えてよいのでしょうか。

◆①の回答：

本実験での衝突速度は最大でも8 m/s程度であり、ひずみ速度効果が耐力比を2倍にするような大きな影響を及ぼすとは考えられません。むしろ、最大支点反力を動的耐力と定義していますので、重錘衝撃力の作用による慣性力の影響が大きいものと考えております。

◇②の質問：重錘の寸法による支点反力の大きさの変動が示されていますが、この支点反力の大小は主にどのような原因あるいはメカニズムによるものと考えればよいのでしょうか。

◆②の回答：

重錘の直径が大きいほど支点反力は大きくなる傾向がありますが、この傾向は静的な押し抜きせん断試験で見られる傾向と同様です。これは、重錘の直径が大きいほど、押し抜きせん断コーン（押し抜きせん断断面）が広域的に形成されるためです。また、重錘の直径が大きいほど支点に近づきますので、より支点反力は大きくなる傾向にあるものと考えております。

論文題目：“PVA短繊維を混入したRC梁の重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション”

著者：岸徳光，栗橋佑介，三上浩

掲載：Vol.54A, pp.1044~1054, 2008年3月

◆討議[別府万寿博（防衛大）]

◇質問：（1）PVA短繊維のランダムな配向性はどのようにモデル化しているのでしょうか。（2）PVA短繊維コンクリートとして均質化したモデルでは、シミュレーションできないのでしょうか。

◆回答：

（1）コンクリートに混入したPVA短繊維は、コンクリートにひび割れが発生した後、ひび割れの開口を抑制する、いわゆる架橋効果を発揮します。この架橋効果は、短繊維混入コンクリートの架橋効果を円柱供試体の一軸引張試験により、ひび割れ発生後の残存引張強度として評価することが可能です。従いまして、本研究では、ランダムに配向したPVA短繊維の架橋効果を一軸引張試験により把握するとともに、短繊維の架橋効果をシェル要素にモデル化して、コンクリート要素の間に配置する形でモデル化しております。

（2）PVA短繊維コンクリートの引張側の応力-ひずみ関

係は、論文にも示しておりますように、ひび割れの発生に伴って応力が急激に低下した後、短繊維の架橋効果により一定の残存引張応力を保持した後、徐々に応力が低下する、極めて複雑な性状を示すことが明らかになっております。そのため、本研究では、敢えて均質化したモデルとせずに、コンクリートの特性と短繊維の特性を分離してモデル化することとしております。

論文題目：“三層緩衝構造を設置したトンネル坑口部の衝撃挙動に関する実規模実験と数値解析的検討”

著者：川瀬良司，岡田慎哉，鈴木健太郎，岸徳光

掲載：Vol.54A, pp.1055~1066, 2008年3月

◆討議[別府万寿博（防衛大）]

◇質問：（1）各種の岩等のシミュレーションを行うには、詳細なモデル化が必要でしょうか。（2）緩衝工が無い場合のシミュレーションが行われていない理由は何でしょうか。

◆回答：

（1）本研究では、極力精度の高い解析結果を用いて実験結果との比較検討を行うため、標準貫入試験や速度検層等の地質調査結果を用いて、地盤の弾性係数、単位体積質量およびポアソン比を定めております。

ただし、これまで検討してきた種々の解析結果を見ますと、地盤の特性値が解析結果に及ぼす影響は大きくはありませんので、実務においてはN値から各特性値を設定することで対応可能であるものと考えております。

（2）通常、この種の構造物には緩衝工を敷設しておりますので、本研究においても同様のケースについてのみ検討することと致しました。なお、緩衝工のないケースについては、現場条件等、必要に応じて検討したいと考えております。

論文題目：“RCアーチ構造形式の耐衝撃設計に関する実規模実験および数値解析的検討”

著者：岡田慎哉，岸徳光，今野久志，西弘明

掲載：Vol.54A, pp.1067~1076, 2008年3月

◆討議[①別府万寿博（防衛大）、②三輪幸治（防衛大）、③安藤智啓（防衛省技術研究本部）]

◇①の質問：（1）実際の現場では、敷砂はどのように管理されているのでしょうか。（2）降雨時を想定した場合も、敷砂の材料モデルは変更する必要はないのでしょうか。

◆①の回答：

(1) 現場においては、敷砂の上に飛散防止用の砂利や礫が敷かれておりますので、敷砂厚等はほぼ一定に管理されているものと考えております。

(2) 厳密には降雨時には敷砂の含水比が変わり、物性が多少変化するものと考えられますが、構造物本体への影響は大きくはないものと考えております。従いまして、現段階では、降雨時における解析モデルの変更等は考えておりません。

◇②の質問：(1) 解析モデルにおいて、落差 20 m の場合は解析と実験結果が一致しない理由は何でしょうか。ひずみ速度効果の影響についてはいかがでしょうか。(2) 実際の落石に対する設計を考える上で、平坦な形状の重錘を用いた実験は適切と言えるのでしょうか。

◆②の回答：

(1) 落差 20 m の場合については、本解析に用いた敷砂モデルの適用範囲の問題と、本体の損傷の再現性の問題による差異が発生していると考えます。解析上の入力エネルギーが敷砂モデルの精度の確認された範囲よりもやや大きめとなっており、解析精度が若干ですが低下したものと思われます。また、損傷状況についても、実験では曲げによる損傷でしたが、解析ではせん断による損傷も見られました。なお、このレベルでのひずみ速度硬化は解析結果に大きな影響を与えるほど生じているとは考えにくく、本解析でも考慮しておりません。

(2) 実際の落石は一般的に平坦な形状よりも球状に近いと思われるので、球状に近い重錘のほうが実現象に近い実験になるかと思えます。

◇③の質問：RC 製アーチ構造に関する設計法の確立を目指すにあたって残留変位は一つの重要な指標と考えられますが、本研究では残留変位があまり合わなかったという結果が報告されました。今後さらに残留変位が合うように解析精度の向上を目指していくのか、それとも最大変位等の指標を用いるということで、解析精度は本研究程度で良いと考えるのでしょうか。

◆③の回答：

残留変位は、構造物の限界状態を規定するための重要な指標であると考えておりますので、今後も更なる解析精度の向上を図る必要があると考えております。

論文題目：“大型RC梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案”

著者：岸 徳光，今野久志，三上 浩，岡田慎哉

掲載：Vol.54A, pp.1077~1088, 2008 年 3 月

◆討議[①藤掛一典 (防衛大), ②安藤智啓 (防衛省技術研究本部), ③別府万寿博 (防衛大) ]

◇①の質問：提案式の実験結果への対応はどうなっているのでしょうか。

◆①の回答：

本研究では、筆者らが過去に実施した静的曲げ耐力が異なる 2 種類の大型 RC 梁に対する重錘落下衝撃実験を対象として数値シミュレーションを行い、実験結果との比較のもとに解析結果の妥当性を検証した上で、パラメータスタディを実施しております。この数値解析結果をもとに提案式を誘導しておりますので、実験結果にもよく整合しているものと考えています。

◇②の質問：提案式で質量比  $W/B=1.25$  以上の場合には、 $W/B$  の値は 1.25 として計算してもかまわないものなのでしょうか。

◆②の回答：

相対残留変位と質量比の関係より、質量比が 1.0 より小さい範囲では、残留変位に及ぼす質量比の影響が大きく示されております。質量比 1.0 と 1.25 における残留変位はほぼ同程度の値となっておりますので、質量比が 1.0 以上の範囲では残留変位に及ぼす質量比の影響は非常に小さくなることから解析結果より推察されます。しかしながら、本研究では質量比が 1.25 より大きい場合についての検討は行っておりませんので、提案式の適用に際しては解析による確認が必要であるものと考えております。

◇③の質問：提案式において、コンクリート強度の適用範囲はどのようになっているのでしょうか。

◆③の回答：

提案式の誘導に際しては、コンクリート標準示方書に基づいて算定した RC 梁の静的曲げ耐力をパラメータとして整理検討しております。この中にはコンクリート強度も考慮されておりますので、本提案式は一般的なコンクリート強度を有する RC 梁に対する耐衝撃設計に適用可能であるものと考えています。