

16. 衝撃問題

とりまとめ：大野友則（防衛大学校）

論文題目：“せん断スパン比などを変えた PC 梁の衝撃載荷実験”

著者：黒田一郎，塩野谷 昇，山本佳士，古屋信明，中村佐智夫

掲載：Vol.53A, pp.1181～1190, 2007 年 3 月

◆討議[梶田幸秀（九州大学）]

（1）残存せん断耐力が急激に低下するとき、試験体はどのような状態になっているのですか？例えば、破壊モードの違いなどは？

（2）せん断スパン比  $a/d$  と支点の影響が合わさった結果でなっていますが、せん断スパン比が何にどのように影響するのか理解しにくいのですが、

◆回答：

（1）無傷の供試体と同程度のせん断耐力が静的載荷時に残存していた供試体では、衝撃載荷による損傷は、全くせん断ひび割れが生じていないかもしくは目視で確認しうる程度のせん断ひび割れに限定されていました。それに対して、せん断耐力が低減していた供試体では、衝撃載荷によってせん断ひび割れの開口が認められました。

（2）終局時の状態は、せん断スパン比(以下、 $a/d$ )が小さな供試体ではせん断圧縮破壊、 $a/d$  が大きな供試体では斜め引張破壊となっており、 $a/d$  の違いが破壊形態に大きく影響を及ぼしていました。

論文題目：“小型 RC 製アーチ模型の耐衝撃挙動に関する実験的研究”

著者：川瀬良司，岸徳光，今野久志，岡田慎哉，鈴木健太郎

掲載：Vol.53A, pp.1191～1202, 2007 年 3 月

◆討議[①梶谷 浩（金沢大）②大野友則（防衛大）]

◇①の質問：図-8 に示されている吸収エネルギーで、 $H=4m$  以下の場合には W20 と W80 で大きく異なっているが、W80 で小さな値となる理由は何でしょうか

◆①の回答：図-9 のひび割れ分布性状から、試験体 W80 の場合には、衝突速度  $V=4m/s$  まではアーチ構造全体の損傷

が小さいが、 $V=5m/s$  以降では載荷点近傍に押し抜きせん断面が形成されて脆性的な破壊が発生することにより急激な吸収エネルギーの増加が生じたものと考えられます。

一方、試験体 W20 の場合には、 $V=4m/s$  以下においても載荷点近傍領域を除いたアーチ部外周面全体に法線方向ひび割れが発生していることより、アーチアクションのみならず構造全体が曲げ的作用も大きく受けていることが推察され、従って載荷点の変位も大きくなるため対応して吸収エネルギーも大きくなるものと考えられます。

以上より、試験体 W80 の吸収エネルギーは、衝突速度  $V=4m/s$  以下においても試験体 W20 より小さな値を示したものと判断されます。

◇②の質問：衝撃実験に用いた重錘の重量はいくらでしょうか？また、結果の整理を重錘の落下速度  $V$  で整理しているが、重錘の重量も破壊に影響するので、速度ではなく入力エネルギー等で整理した方が有用であると考えられます。

◆②の回答：重錘は、本文に示されている通り 300kg の鋼製の重錘を用いています。本論文では、試験体形状にかかわらず重錘形状、質量を統一しております。したがって、本論文においては速度で整理してもとくに問題ないものと考えられます。しかしながら、他の衝撃問題等との比較や検討を行うためには、入力エネルギーで整理した方が有用と考えられますので、今後の参考とさせていただきます。

論文題目：“RC アーチ構造の衝撃応答解析手法の開発に関する研究”

著者：岡田慎哉，岸徳光，今野久志，川瀬良司

掲載：Vol.53A, pp.1203～1208, 2007 年 3 月

◆討議[①園田佳巨（九州大）②安藤智啓（防衛省）③藤掛一典（防衛大）]

◇①の質問：コンクリートの応力～ひずみを弾塑性でモデル化しているが、実際と合わないのではないかと。

◆①の回答：著者らは、簡易で実験結果に適切に対応できる構成則の構築を目指して、形状寸法の異なる各種の RC 梁に関する重錘衝撃実験結果を下に、提案の構成則を適用した数値解析結果の妥当性を検討してきました。現段階で

は、RC 梁に関しては、曲げ破壊型やせん断破壊型等の破壊型に関わらず高い精度を有していることを確認しておりますので、アーチ部材に対しても十分適用可能であるものと考えております。しかしながら、アーチ構造の場合には、曲げと軸力が連成して作用しますので、その影響に関する検討は RC 梁の場合に比較して十分ではありません。今後とも継続して比較を行い、精度の向上に努めたいと考えております。

◇②の質問：載荷点変位波形の残留成分の部分が実験結果と合わない理由は何か、帯筋をモデル化しなかったことが原因ではないか。

◆②の回答：帯筋については実験と同様にモデル化しておりますので、そのことが原因ではないものと判断されます。それよりも、基部の損傷度合いに差が生じていますので、そのことが影響しているのではないかと推察しております。今後とも継続して詳細に検討したいと考えております。

◇③の質問：解析と実験結果が比較的良い一致を示しているが、解析で用いる構成材料にひずみ速度効果は考慮しているのか

◆③の回答：本研究では小型模型を対象に検討を行っております。また、重錘の衝突速度も小さいことより、RC 梁の場合と同様にひずみ速度効果の影響は考慮しておりません。今後種々検討して行く中で、必要性が認識された段階で考慮したいと考えております。

論文題目：“鋼製砕砂防堰堤の耐衝撃性能の解析的評価方法に関する基礎的研究”

著者：園田佳巨，加藤尚，神田幸弘，大隅久  
掲載：Vol.53A, pp.1209～1218, 2007年3月

◆討議[①石丸和宏（明石高専）②大野友則（防衛大）  
③岸徳光（室工大）]

◇①の質問：中詰材として2種類あるが、どのように配置したのか。千鳥配列は検討していないのか。本検討での配置は現実的ではないと考えられるが。

◆①の回答：本研究において中詰材は2種類とも直交配列でモデル化しています。個別要素法では、要素の配列がその挙動に大きく影響するため、直交配列より千鳥配列の方が現実に近い状態かもしれませんが、実際の中詰材は粒子の形状や粒径が不均一であり、忠実にモデル化することは困難であるだけでなく、あまり現実的でないと考えており

ます。従いまして、中詰材の状態を適切に表現するために、粒子法などに用いられるような影響領域を導入することで妥当な抵抗特性を発揮できるように今後改善していきたいと考えております。

◇②の質問：衝突した礫が貫通する際の中詰要素の挙動はどのようになっているのか

◆②の回答：論文中的貫通シミュレーションは、他の解析とは異なり、中詰材をモデル化していない鋼製枠のみの構造モデルに対するものです。この解析は、鋼製枠に適切な降伏・破壊条件を設けることで、鋼製枠の破壊を表現可能であることを示すために、あえて行ったものです。実際の鋼製枠砂防えん堤において、衝突した礫が貫通するためには鋼製枠の破壊と中詰材の流出がともなうことになり、現実には発生しにくい現象であると思われる。

◇③の質問：球として取り扱っているが、ダイラタンシーの影響はどのように考慮しているのか

◆③の回答：現在の中詰材モデルは、要素間相互の接触力や摩擦力を評価している基礎的な考察段階であるため、ダイラタンシーの影響？については、各要素の配置の変化として解析的に反映されているだけです。中詰材の緩衝効果との関連性について、今後、検討していきたいと考えております。

論文題目：“桁端衝突による橋台の損傷度評価および衝突ばね特性に関する基礎的研究”

著者：玉井宏樹，園田佳巨，後藤恵一，梶田幸秀，  
濱本朋久

掲載：Vol.53A, pp.1219～1226, 2007年3月

◆討議[①古屋信明（防衛大）②岸徳光（室工大）]

◇①の質問：橋台背面の土砂を弾性ばねとして評価しているが、本研究対象のような状態では受動土圧状態だから非常に硬いばねになる。したがって、実際に近いばね定数を用いた場合は橋台の損傷状態は違ってくると考えられるがどうか。

◆①の回答：本研究では、橋台背面の裏込め土を全て弾性ばねでモデル化しているわけではなく、橋台背面と裏込め土との間に簡易な接触モデルを用いて対応しております。つまり、弾性体と仮定した裏込め土に重力加速度を与え、ポアソン効果で水平支持を保つようなモデルになっております。このモデルにより橋台背面が受ける圧力分布と、ラ

ンキンの土圧理論により簡易に計算された圧力分布とが概ね等しいことを確認しております。しかし、裏込め土を弾性体で仮定したり、橋台背面と裏込め土との摩擦係数を簡易に決定したりしていることを考えると、現実の土圧とは多少の相違は見られるものと考えております。

◇②の質問：構成則に関する妥当性について

◆②の回答：過去に本研究で用いた手法および構成則を用いて、小型 RC 梁の重錘落下衝撃実験に対する検証を行った結果、衝撃力、支点反力、変位応答の3項目に関しては概ね良好にシミュレートできることが把握されていますので、本手法と使用した構成則は適切なものであると認識しております。なお、コンクリートには圧力依存性があることが一般に知られていますが、既往の研究で von Mises と Drucker Prager の両モデルが RC 梁の衝撃応答特性に与える影響は小さいという報告がなされておりますので、本研究ではコンクリートに対しても鉄筋と同様に von Mises の降伏条件を採用しております。

①の質問で指摘されているように、挙動が複雑な土の構成モデルを簡易に弾性体と仮定した影響は少なからずあるものと考えておりますので、その点に関しては検討していく必要があると考えております。

論文題目：“破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討”

著者：岸徳光, Abdul Q. Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉  
掲載：Vol.53A, pp.1227~1238, 2007年3月

◆討議[①園田佳巨 (九州大) ②大野友則 (防衛大)  
③藤掛一典 (防衛大) ]

◇①の質問：破壊エネルギー等価の概念というものを単純に大きな要素に適用してもよいのか

◆①の回答：実規模 RC 構造物の耐衝撃挙動解析を小型部材と同程度の精度で可能にすることによって、RC 構造物の合理的な耐衝撃設計法の確立に向けた検討を、実験的手法と解析的手法を併用して効率的に推進することができます。本論文はこのような観点から検討を行ったものであります。

実構造物の衝撃応答解析において問題となるのは、自由度が飛躍的に増大することです。本論文では構造物の衝撃応答性状を損なわずして効率的に自由度を低減するための手法として、このような引張破壊エネルギー等価の概念の導入を提案しました。

概念の基本的な考え方は、本文でも述べておりますよう

に、着目している領域に1個のひび割れが発生する状態を想定し、大きい要素を用いる場合においても小さい要素を適用する場合と同様にひび割れ発生しかつ同様な応答性状が発揮されるようにするあめに、大きい要素の引張破壊エネルギーが小さい要素と等価になるように、仮想的な引張強度を設定するものであります。

従って、荷重点近傍等ひび割れが多く発生するような領域に対しては、局所的な応力を適切に評価するために小さい要素を適用しなければならないことは勿論であります。ただし、本論文のように荷重点近傍等に関わらずに支点近傍を除く全領域に対して等しく要素分割する場合においても、大略実験結果と類似の解が得られております。このような結果は、引張側下縁にひび割れが発生する場合には鉄筋要素が引張力を負担することより、ひび割れ本数の動的応答性状に対する感度は小さく、ひび割れが発生するか否かが感度に大きく影響することを示唆しているものと判断されます。

◇②の質問：工学的に妥当であるという判断をする際の基準は何か。要素の大きさはどこまで大きくできるのか。

◆②の回答：要素長の衝撃力波形や支点反力波形への影響は小さいことが明らかになっておりますが、変位波形に関しては、最大応答値や徐荷後の自由振動状態における振動周期および残留変位共に大きく影響を受けることが明らかになっております。これより、特に徐荷後の自由振動状態における振動周期と残留変位を妥当である判断基準にしたとを考えます。

また、要素の大きさに関しては、最低腹鉄筋が配筋されている箇所は要素分割しなければなりませんので、現段階では腹鉄筋間隔を最大要素長と考えております。

◇③の質問：破壊エネルギー等価の概念を導入して検討しているが、本理論の有効性は要素に1つのひび割れが形成される場合についてのみ有効であり、おのずと要素のサイズも限定されるのではないのか

◆③の回答：数値解析結果では、せん断補強筋間隔を要素長に取った場合においても大略妥当な解が得られております。また、上述のように、特に曲げ破壊型の場合において、引張側下縁にひび割れが発生する場合には鉄筋要素が引張力を負担することおり、ひび割れ本数の動的応答性状に対する感度は小さく、ひび割れが発生するか否かが感度に大きく影響するものと推察されます。従って、曲げ破壊型の場合に限定して、せん断補強筋間隔程度までの要素長は採用可能であると考えております。

論文題目：“PVA 短繊維を混入した軽量コンクリート製 RC 版の耐衝撃性に関する実験的研究”

著者：栗橋佑介，岸徳光，三上浩，竹本伸一  
掲載：Vol.53A，pp.1239～1250，2007年3月

◆討議[①大野友則（防衛大）②藤掛一典（防衛大）]

◇①の質問：主鉄筋の間隔が 150mm に対して，載荷体の直径は 60mm である．本実験は載荷部の直下は主筋が交叉している位置に載荷した結果であるが，載荷部の下に鉄筋が無い場合は破壊モードや PVA の効果が異なるのではないかと．衝突速度が大きくなると，その影響はさらに大きくなると考えられるが．

◆①の回答：ご指摘のように，衝突体形状および配筋位置の RC 版の破壊モードや耐衝撃性への影響は，衝突速度が速くなりますと大きくなるものと考えられます．ただし，本研究では，短繊維混入コンクリートの落石覆工頂版への適用性の検討を目的としているため，想定している衝突速度は比較的低いものとなっております．従いまして，本研究の範囲内では，上記の要因が耐衝撃性に及ぼす影響は小さいものと考えております．

なお，実験終了後の RC 版中央部切断面を見ますと，載荷点から下縁に向かって押し抜きせん断ひび割れが発生しておりますので，実覆工の場合に対応した破壊性状を示しているものと判断されます．

◇②の質問：普通コンクリート，軽量コンクリート，軽量+PVA コンクリートの価格の比較について

◆②の回答：軽量コンクリートおよび短繊維混入軽量コンクリート（混入率 0.5%）の材料コストは，普通コンクリートの場合に比較して，それぞれ2および3倍程度高くなります．

一方，軽量コンクリートの適用により，上部工の軽量化に伴う下部工断面の縮小やプレキャスト部材の場合には運搬・架設の省力化などが期待できますので，適用方法を工夫することによって全体の経費縮減には繋がるものと考えております．

論文題目：“衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の性能照査型衝撃設計法に関する一提案”

著者：岸徳光，三上浩  
掲載：Vol.53A，pp.1251～1260，2007年3月

◆討議[①園田佳巨（九州大）②大野友則（防衛大）]

③古屋信明（防衛大）]

◇①の質問：提案式の使い方について，実大試験体への適用について教えて欲しい．

◆①の回答：提案式は，既往の提案式と構成は同じですが，試験体の損傷程度（限界状態）に関わらず適用できるところに，既往の提案式との相違があります．

なお，実大試験体への適用に関しては，基本的に本式の適用は問題ないものと思いますが，安全率が試験体寸法によって異なることが推察されます．今後，大型の試験体を用いた実験を行い，安全率が試験体寸法によってどの程度変動するのかを確認したいと考えています．

◇②の質問：提案式における係数 0.42 の物理的意味は何か．

◆②の回答：係数の 0.42 は，例えば，終局限界状態を例に考えますと，最大支点反力と残留変位の関係が平行四辺形分布であるとモデル化する場合において，その吸収エネルギーと入力エネルギーとの比を，最大支点反力に関する静的耐力を基本にして得られた動的応答倍率で除した値に相当します．

また，式的には，静的耐力に換算した動的荷重によって消費されるエネルギーが入力エネルギーの 42% であることを意味していると考えられます．

◇③の質問：今後の課題として，より大型の試験体によるデータを加味することとあったが，論文 16-6 で実規模実験データがあるのにそれを考察の対象としていないのはいいか．

◆③の回答：実規模の実験も確かに一部でなされています．しかし，試験体数がまだ少なく，提案式の妥当性を議論するのは不十分と考えます．今後，実規模実験のデータを増やし，また，類似の大型実験の結果も参考にして，総合的な観点から提案式の妥当性を検討する予定です．

論文題目：“爆発荷重を受ける RC はりの応答に与えるコンクリートの材料モデルの影響に関する解析的研究”

著者：安藤智啓，斉藤和伸  
掲載：Vol.53A，pp.1261～1272，2007年3月

◆討議[①大野友則（防衛大）②石丸和宏（明石高専）]

◇①の質問：解析結果を一つの実験値と比較して解析の精度を論じているが，必ずしも実験結果が正しいとは言えないのではないかと

◆①の回答：

本解析的研究において実験との比較に用いました指標は、鉄筋ひずみ波形と支点反力波形およびひび割れ分布であります。ご指摘の事項は鉄筋ひずみ波形と支点反力波形の信頼性に関する点と思われます。前者につきましては、ひずみゲージ位置がコンクリートのひび割れ位置に合致した場合には測定不可能なほど大きいひずみの検出される場合がありますが、本研究ではゲージ位置近傍のコンクリート側面のひび割れが極めて微細であり、そのためピーク値も $2,000\sim 3,000\mu$ とゲージ容量の範囲内にありました。また、貼付方法につきましても、衝撃実験において通常行われる方法と同様に、鉄筋ひずみ計測用のゲージ(ゲージ長:5mm)を専用の接着剤を用いて鉄筋に貼付し、その後ひずみゲージ全体に防水処置を施しております。リード線もノイズが励起されにくく、かつ防水性の高いケーブルを使用しております。

一方、後者につきましては、衝撃実験において実績のある支点反力波形の測定方法と同じ方法を採用しております。これらを鑑みて、本解析的研究の比較に用いました実験の鉄筋ひずみ波形と支点反力波形の信頼性は高いものと判断しております。ただし、ご指摘の点を払拭するためには、この種の実験データの取得および蓄積が非常に重要であるものと考えますので、今後もこの点に留意して研究を推進していきたいと考えております。

◇②の質問：実測値の波形にノイズが入っているように見えるが、ノイズによる支点反力やひずみ波形への影響はどうか

◆②の回答：

爆発実験は、電圧による発破信号を爆薬に与えて起爆させて行っております。そのため、波形の立ち上がり直前あるいは極初期時間に、この発破信号による電氣的ノイズが波形に重畳される場合があります。ご指摘のように、本解析的研究の比較に用いました実験波形にもこの影響と思われる波形がいくつかあるように見受けられます。ノイズの部分が波形のピーク値となるような場合には、RCはりの耐爆性を実験的に検討する場合に支障をきたすことが考えられますので、今後爆発実験時におけるノイズの除去方法にも傾注して研究を進めてまいりたいと考えております。

論文題目：“C4 爆薬の接触・近接爆発に対するコンクリート板の損傷評価”

著者：大久保一徳，大山浩代，別府万寿博，大野友則，片山雅英

掲載：Vol.53A, pp.1273~1283, 2007年3月

◆討議[①栗橋佑介(寒地土木研究所) ②安藤智啓(防衛省)]

◇①の質問：

無筋コンクリートで検討しているが、対象とする構造物は何か

◆①の回答：

想定している構造物としては、煙火工場における火薬類貯蔵施設や爆破テロを受ける可能性がある重要構造物などである。本研究では、基礎的段階として、まず爆発に対するコンクリート板の厚さの効果を調べることを目的としているので、鉄筋の影響をなくすために無筋コンクリート板とした。

◇②の質問：

解析において、ひずみ速度は引張側も考慮しているのか。ちなみに、 $10^3/s$ 程度のひずみ速度の場合、圧縮強度および引張強度の動的増加率はいくらになるのか。

◆②の回答：

引張側も圧縮側と同様に考慮している。ただし、ひずみ速度が $10^3/s$ 程度の場合には、動的増加に対する実験データは無い。このため、ひずみ速度と増加率に関する実験式(藤掛の式, Rossらの式)を準用して求めている。算定の結果、ひずみ速度が $10^3/s$ に対する圧縮強度の増加率は2.6であり、引張強度の増加率は19.6となる。

論文題目：“地盤の飽和度が爆土圧特性に及ぼす影響とその評価式の提案”

著者：市野宏嘉，大野友則，別府万寿博，蓮江和夫

掲載：Vol.53A, pp.1284~1292, 2007年3月

◆討議[安藤智啓(防衛省)]

実際に地中に鉄筋コンクリート構造物がある場合、飽和の程度によっては破壊しないはずのものが破壊するという理解で良いか

◆回答：

実験の結果、最大爆土圧と力積は、飽和度の上昇にともなっていずれも増加することがわかった。例えば、9.7gの爆薬が爆発した場合、爆源から65cmの位置で、飽和度が51.6%から97.9%の上昇すると、最大爆土圧は5.3倍、力積は1.7倍増加した。したがって、ある薬量の爆薬が地中で爆発した場合、飽和度が高ければ破壊に至ることもあり得ると考えられる。