

15. 衝撃問題

とりまとめ：園田佳巨（九州大学）

論文題目：“実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価”

著者：田島与典，前川幸次，岩崎征夫，河上康太
掲載：Vol.56A, pp.1088-1100, 2010 年 3 月

◆討議 [川瀬良司（構研エンジニアリング），園田佳巨（九州大学）]

- 1) 落石が発生して R 型緩衝装置が作動した後のメンテについてどのように考えられていますか。
- 2) 落石発生後の R 型緩衝装置の残存吸収エネルギーについてどのように考えられていますか。
- 3) 緩衝材(2 種類)の設置位置について，どのように考えて決めておられるのでしょうか。

◆回答：

- 1) 未使用部品に交換することを原則とします。この理由として，作動後の R 型緩衝装置内部におけるワイヤロープとの接触面は，ワイヤロープが滑る際の摩擦によって磨耗するため，エネルギー吸収性能が低下することがあげられます。なお，作動後も再使用できる緩衝装置は，メンテナンス費用の低減につながるため，今後の検討課題の一つとして捉えています。
- 2) 落石発生後におけるワイヤロープ滑り量の残分に依存します。残分が 0 であれば残存吸収エネルギーは 0 です。ワイヤロープ滑り量に残分がある場合の残存吸収エネルギーは，理論計算上，次式で求められます。

$$E_r = T \cdot l_r$$
 E_r ：残存吸収エネルギー[kJ]， $\bar{T}$ ：緩衝装置の平均滑り張力[kN]，R 型緩衝装置の性能確認実験では約 28kN， l_r ：ワイヤロープ滑り量の残分[m]
 ただし厳密には，滑り量に応じて平均滑り張力は変化するため，残存エネルギーを正確に求めることは難しいと考えています。
- 3) U 型は滑り長部分のワイヤロープが下方へ垂れ下がるため，リング形状となる R 型を本体側（金網設置面）に設置した方が美観的に好ましいと考えられることから，景観を考慮して各緩衝装置の設置位置を決定しています。

論文題目：“敷砂緩衝材を設置しない RC 製ロックシェッド模型の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験”

著者：今野久志，岸徳光，栗橋祐介，山口悟，西弘明
掲載：Vol.56A, pp.1101-1112, 2010 年 3 月

◆討議 [榊谷浩（金沢大学）]

実験から判断して，ロックシェッドの終局限界状態はどのようなものと考えていらっしゃるのでしょうか。

◆回答：本論文のように，敷砂緩衝材を設置しないロックシェッドでは，重錘衝突により頂版コンクリートがコーン状に押し抜けられ，内空側にかぶりコンクリートが剥落するような状態を終局限界状態と想定しています。敷砂緩衝材を設置した場合は，今後，実験結果や解析結果を基に終局限界状態を設定したいと考えております。

論文題目：“鋼管坑頭部に H 形鋼を併用した落石防護擁壁の重錘衝突実験”

著者：川瀬良司，岸徳光，西弘明，牛渡裕二，刈田圭一
掲載：Vol.56A, pp.1113-1122, 2010 年 3 月

◆討議 [榊谷浩（金沢大学），園田佳巨（九州大学）]

- 1) 横荷重しか作用しないことから，支持層まででなく短い長さ（3m 程度）の鋼坑で十分に思われるが，どのように考えますか？
- 2) 二層緩衝構造を設けることで，衝撃荷重の作用時間が長くなり杭の負担が大きくなる心配はないのでしょうか。

◆回答：

- 1) 本工法は，軟弱な地盤への設置を対象としているため，自重に対して支持可能な鋼管杭の根入れ長が必要となります。本研究における鋼管杭の必要根入れ長の考え方は，摩擦杭であるため，杭の支持力が確保できる必要長さかつ，半無限長の杭とみなせる $3/\beta$ 以上を確保することとしております。
- 2) H 形鋼併用杭付擁壁に二層緩衝構造を設置する場合の実験結果は，重錘衝突エネルギーが同等で付設しない場合に比べて重錘衝撃力波形の波動継続時間が 4 倍程度長くなりますが，最大重錘衝撃力は 1/5 程度以下の値を示します。
 また，杭の引張りずみ最大応答値は，二層緩衝構造を設置する場合が $1,900\mu$ に対して，重錘衝突エネルギーが同等の付設しない場合は $2,180\mu$ と 85%程度に減少することが，実験結果より明らかとなっています。
 このため，二層緩衝構造の設置により，H 形鋼併用杭付擁壁本体へ作用する衝撃力を大幅に緩衝することが可能ですので，作用時間が多少長くなっても杭の負担が大きくなることはありません。

論文題目：“緩衝材用木材の圧潰特性に及ぼす温度(80℃以下)とひずみ速度の影響評価”

著者：白井孝治，南波宏介，藤田佳之
掲載：Vol.56A, pp.1123-1136, 2010 年 3 月

◆討議 [玉井宏樹（福岡大学），園田佳巨（九州大学）]

- 1) 圧潰するような実験を行っておられますが、どのようにひずみを測定したのですか。
- 2) 解析においてはポアソン比をゼロと仮定しておられますが、構成式にどのように異方性を考慮しておられますか
- 3) 木材のひずみ速度効果の原因について(破壊形態の変化など)、何か有用な情報があれば教えて下さい。

◆回答：

- 1) 本試験では、木材がボトミングアップ（圧縮されると空隙がなくなり圧壊荷重が急上昇する変形限界に達する状態）を起こすまでの変形領域（公称ひずみで 50%以上）を対象としております。このため、変位を与える載荷用鋼製棒先端付近に直接レーザー変位計を取り付け、基準点からの差異を載荷変位とし、ひずみに換算しております。
- 2) 実際の輸送容器の緩衝体では、空間を仕切り板により分割し、完全拘束条件となるように木材を充填しています。また、全ての輸送容器の落下姿勢で所定の緩衝効果が発揮されるように、分割領域毎に木目方向の配置を換えております。落下方向に応じて木目の方向は異なりますので、本来は異方性を考慮したモデルを採用するべきですが、今回の論文では、落下解析の姿勢に応じ、分割領域毎に、落下方向と木目方向と一致する完全拘束条件で取得された物性を定義して解析を実行することにより、評価に必要な精度が確保されることを確認しております。
- 3) 木材は、ボトミングアップ（圧縮されると空隙がなくなり圧壊荷重が急上昇する変形限界に達する状態）を起こすまでの変形領域（公称ひずみで 50%以上）とそれ以下の領域で大きく強度が変化することが知られています。今回の試験では、輸送容器の耐衝撃設計上考慮されるボトミングアップを起こさない領域の速度依存性を対象とし、かつ、強度に大きく影響を与える密度や含水率が実運用において厳しく管理されることを前提にデータを取得しております。したがって、これら木材のパラメータが動的強度に及ぼす影響の度合いを把握するには十分でなく、また、ひずみ速度効果に及ぼす材料学的な検討は未着手であり明快なお答えは持ち合わせておりませんが、既往の文献 (D. G. Hepworth, et al., "Variations in the morphology of wood structure can explain why hardwood species of similar density have very different resistances to impact and compressive loading", *Phil. Trans. R.Soc. Lond. A* 2002 360) によれば、繊維内の形態（気泡サイズや形状、その配列間隔や方向等）に依存するとの報告がなされております。

論文題目：“実規模 RC 桁の繰返し重錘落下衝撃挙動解析に関する破壊エネルギー等価概念の適用性検討”

著者：岸徳光，今野久志，三上浩
掲載：Vol.56A, pp.1137-1148, 2010 年 3 月

◆討議 [藤掛一典 (防衛大学校)]

- 1) 衝撃応答解析では要素寸法が小さくなると精度が上がるの

ですか

- 2) コンクリートを均質な材料とみるためには、やはりある程度の要素の大きさが必要かと思われすが、いかがでしょうか。

◆回答：

- 1) 要素の引張強度が一定で、かつ長手方向に対して直角方向に 1 個の貫通ひび割れが発生するものと仮定する場合に長手方向の要素長としてある基準長を設定しますと、
 - a) 要素全体が破壊エネルギーに達しなければひび割れが発生すると評価されません。従って、長手方向の要素長が基準要素よりも小さい場合には、基準要素の破壊エネルギーに達する前にそれ自身の歪エネルギーが破壊エネルギーに達しますので、基準要素よりも早期にひび割れが発生することになります。
 - b) 従って、上述の仮定の範囲では、要素寸法が基準要素の要素長よりも小さい場合には、必ずしも精度が上がるとは言えないと思います。
- 2) 標準要素長は、コンクリートの静解析における基準 G_f と同様に骨材の大きさに影響されると判断されます。本論文の場合には、断面方向の要素長を考慮せず軸方向要素長にのみ着目して検討しておりますが、動的な破壊エネルギーを論じるためには、断面方向の大きさも考慮に入れた詳細な検討が必要と判断されます。今後の課題とさせていただきます。

論文題目：“支持条件の異なる RC 版の静的および衝撃荷重載荷実験”

著者：岸徳光，三上浩，栗橋祐介
掲載：Vol.56A, pp.1160-1168, 2010 年 3 月

◆討議 [別府万寿博 (防衛大学校)，佐々木智大 (東京工業大学)]

- 1) 支持条件が支点反力に大きく影響する理由を教えてください。
- 2) 支持条件は応答変位にはあまり影響しない理由を教えてください。
- 3) 静的実験では $S4 \rightarrow S2 \rightarrow S1$ の順に剛性が低下しており、大きく異なる挙動を示しているが、衝撃荷重が作用した場合に $S2$ と $S1$ に違いが見られなかったのはなぜですか。

◆回答：

- 1) 支点反力に関しては、支持辺の数が多い場合ほど、応答波形の振幅が大きくかつ主波動継続時間が短い性状を示すこととなります。これは、支持辺の数に対応して RC 版のたわみ剛性が大きくなることによるものです。
- 2) 応答変位には、RC 版の曲げ変形の成分と押抜きせん断の成分が混在しており、その割合は支持条件によって異なってきます。今回の実験では、支持条件があまり影響しないような性状を示しておりますが、版厚等が変わると傾向が変わる可能性があります。この点については今後の検討課題とさせていただきます。
- 3) 静的実験では、載荷荷重を徐々に増加させているため、支持

条件の違いが RC 版のたわみ剛性に及ぼす影響が顕著に現れるものと考えられます。一方、衝撃荷重実験では、載荷速度が大きく、RC 版も瞬間的にたわむため、1 辺+2 隅角点支持 (S1) の場合には、曲げ変形のしやすい方向に変形し、あたかも 2 辺支持 (S2) であるかのように挙動したことによるものと推察されます。なお、先ほどのご質問にも関連しますが、このような傾向は、版厚等によって変化する可能性がありますので、今後実験等により検討させて頂きたいと思います。

論文題目：「SPH 法を用いた衝撃解析の離散化程度および解析精度に関する基礎的研究」

著者：深澤仁，園田佳巨，玉井宏樹

掲載：Vol.56A, pp.1169-1176, 2010 年 3 月

◆討議 [佐々木智大 (東京工業大学)]

- 1) SPH の計算コストは FEM と比較してどの程度増えるのでしょうか。
- 2) SPH を静的問題に適用した場合の精度はどうでしょうか。

◆回答：

- 1) SPH 法と FEM の計算コストを単純はりの弾性解析 (SPH モデルは、はり高さ方向に FEM モデルの 5 倍程度密な離散化を採用) を行って比較しました。その結果、SPH 法の方が FEM に比べて 2.4 倍ほど解析時間が長く必要でした。FEM 解析には汎用ソフトを用いているので、ソルバー性能等の差が考えられますので単純に比較することはできませんが、一般的に SPH が FEM と同程度の解析精度を有するには細かい離散化が必要ですので、数倍程度は計算コストが大きくなると思われます。
- 2) SPH は、時間増分毎に運動方程式等を解いて粒子位置を更新する動的な解析手法ですので、十分に解析上の時間が経過して、変位応答等の値が収束した場合を準静的問題と仮定しますと、今回の計算結果では厳密解と数%の誤差の範囲内で応答は収束しております。

論文題目：「小型 RC ラーメンスラブ模型の耐衝撃挙動に関する重錘落下衝撃実験と数値解析的検討」

著者：川瀬良司，岸徳光，今野久志，牛渡裕二，鈴木健太郎

掲載：Vol.56A, pp.1177-1188, 2010 年 3 月

◆討議 [榊谷浩 (金沢大学)，園田佳巨 (九州大学)]

- 1) 繰り返し衝撃を考慮した複雑な解析を行っておられますが、どのような利点があるのでしょうか。
- 2) 細かな要素を使用しておられますが、破壊エネルギー G_f を考慮した引張強度の変化を考慮する必要はないのでしょうか。

3) コンクリートの材料特性について

- a) 完全弾塑性と仮定したものと Drucker-Prager の降伏条件を用いたことは相矛盾するのではないのでしょうか。
- b) 圧縮側のリミット(圧縮強度)は設けていないとすれば、コンクリートの圧壊現象は表現できないと思いますが、いかがでしょうか。

◆回答：

- 1) 構造物に生ずる累積損傷や残存耐力を適切に評価する手法を確立するために実施しております。
- 2) 今回の解析につきましては、比較的細かい要素分割で実施しましたが、既往の研究より、適切な基準要素長を設定することで、要素分割数を低減した場合においても妥当な数値解析結果が得られることが明らかになっておりますので、今後検討していきたいと考えております。
- 3)
 - a) 質問の趣旨がよく理解できないですが、本研究ではコンクリート単体ではなく、鉄筋コンクリート構造体を取り扱っておりますので、コンクリートがたとえ降伏点に達した場合におきましても、歪が単純に無限大に増加することはありませんし、除荷状態に陥る場合も想定されます。また、このような状況下で Drucker-Prager の降伏条件式を適用することに特に問題はないと判断しております。
 - b) 討議者がどのような現象を圧壊と定義しているかは分かりませんが、示方書では歪で規定しているように思います。著者らはコンクリート示方書に即して対応しております。また、本研究では鉄筋コンクリート構造体を取り扱っておりますので、コンクリート要素がたとえ降伏点に達したからと云って圧縮歪が無限に増加することはないと判断しております。解析結果もそのような現象には至っておりません。特に問題はないものと判断しております。

論文題目：「鉄筋コンクリート構造物の発破解体に関する基礎的研究」

著者：伊藤オ・ピラック，藤掛一典，大野友則

掲載：Vol.56A, pp.1189-1195, 2010 年 3 月

◆討議 [園田佳巨 (九州大学)，榊谷浩 (金沢大学)]

- 1) 爆発(発破)荷重を受けて露出した鉄筋には、材料特性の変化等が生じているのでしょうか。
- 2) 発破後の残存耐力が大きいことが予想される場合、爆薬量を増やすこととせん断補強筋をあらかじめ除くことのどちらが現実的な対応と考えますか。

◆回答：

- 1) 本研究では、発破試験後に露出した鉄筋の材料特性を調べる試験は行っておりませんが、静的な材料特性を用いて解析的に評価した残存耐力と実際に実験で得られた残存耐力が概

ね一致していたことから、発破の前後における鉄筋の材料特性の大きな変化はないものと考えております。

2) 本研究結果に基づきますと、発破後の残存耐力を確実に小さ

くするためにはせん断補強筋をあらかじめ取り除いておくことが現実的な対応と考えております。