

# 論文 放射性廃棄物を保管対象とした鉄筋コンクリート製容器の落下挙動解析

小室 雅人<sup>\*1</sup>・東 洋輔<sup>\*2</sup>・多田 克彦<sup>\*3</sup>・川瀬 良司<sup>\*4</sup>

**要旨：**本論文では、放射性廃棄物を保管対象とした RC 製容器の落下抵抗性を確認するために実施した衝撃実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検証した。その結果、提案の数値解析モデルを用いることにより、1) 衝突後の RC 製容器の動的挙動をほぼ適切に再現可能であること、2) RC 製容器に発生したひび割れ状況に関しては、実験結果と比較して衝突部や蓋隅部に多く生じているものの、全体的にはほぼ適切に評価可能であることが明らかとなった。

**キーワード：**RC 製容器、落下抵抗性、衝撃応答解析、有限要素法

## 1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震によって福島第一原子力発電所が被災し、膨大な量の放射性廃棄物が発生した。現在、それらを安全に運搬・保管することを目的に、様々な仕様の鉄筋コンクリート (RC) 製容器が開発・提案されている<sup>1),2)</sup>。著者らも迅速な震災復興に貢献することを目的に、この種の RC 製容器を開発・改良しているところである。

RC 製容器の要求性能としては、遮蔽性、耐久性および安全性が挙げられる。特に、安全性に関しては輸送時における荷台からの落下に対する抵抗性も考慮しなければならず、文部科学省では「放射性同位元素等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告知」において、容器の落下試験を行い内容物の漏洩がないことを検証することを定めている<sup>3)</sup>。

このような背景を踏まえ、著者らは現在開発中の RC 製容器の落下抵抗性を検証するために、トラックの荷台からの落下を模擬した衝撃実験を実施した<sup>4)</sup>。その結果、1) 容器外面に軽微なひび割れは発生するものの、内面までに貫通するひび割れは確認されず、かつ 2) 容器内に格納した放射性廃棄物を模擬した粉体は外部に漏洩しないこと、などを高速度カメラによる詳細な映像分析などによって実験的に確認している。一方、これらの容器をより安全にかつ迅速に開発・改良するためには、上述のような実験的検討のみならず、有限要素法などによる数値解析的な検討も極めて重要である。

このような観点より、本研究では、上記の RC 製容器の落下衝撃実験<sup>4)</sup>を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検証した。ここでは、容器の落下挙動およびひび割れ状況

に着目して検討を行った。なお、本数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA<sup>5)</sup>を用いている。

## 2. 落下実験の概要

### 2.1 試験体概要

図-1 には、格納容器の形状寸法を示している。容器の外寸は、平面寸法 1.5 m 四方、高さ (蓋部を含む) 1.2 m である。容器の厚さは、蓋部、側面および底面において、それぞれ 100, 100 ~ 125 および 100 mm である。図-2 には容器の配筋状況を示している。主鉄筋およびフープ筋として D16 (SD345) を 85 ~ 150 mm で格子状に、またハンチ筋として D10 を配置している。本体と蓋部の締結は、

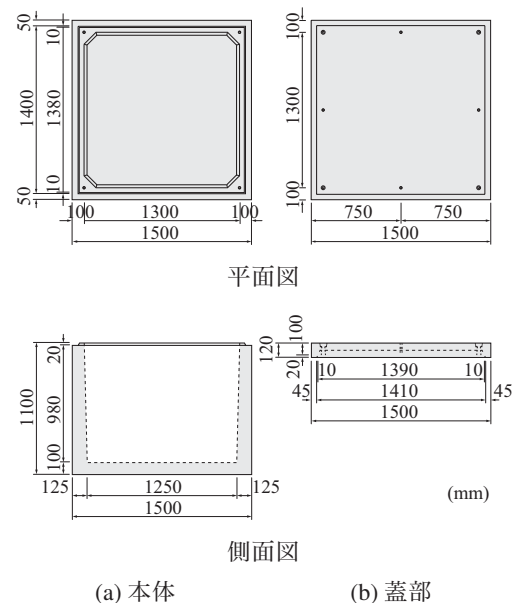


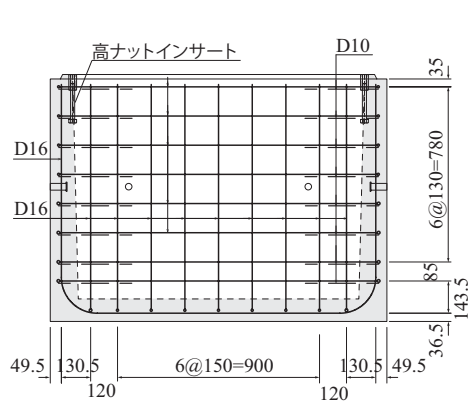
図-1 容器の形状寸法

\*1 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット 准教授 博(工) (正会員)

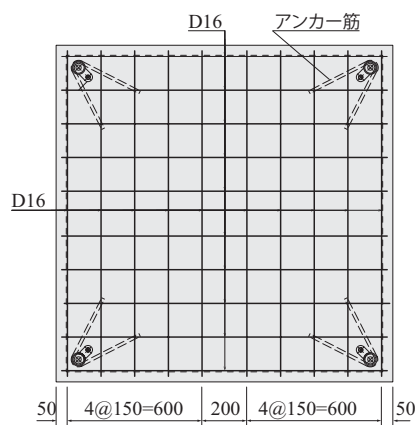
\*2 太平洋セメント(株) 第2研究部 TBC チーム (正会員)

\*3 太平洋セメント(株) 第2研究部 TBC チーム (正会員)

\*4 (株)構研エンジニアリング 常務取締役 博(工) (正会員)

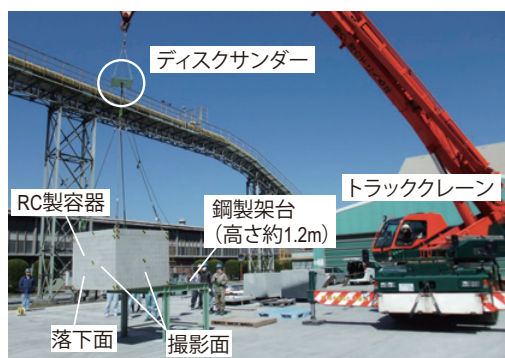


(a) 本体側面図

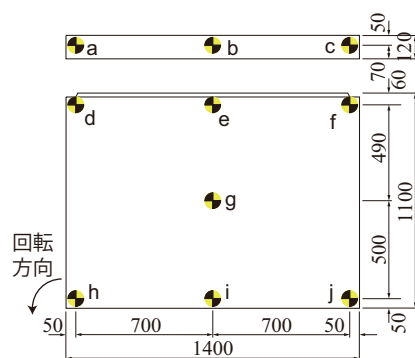


(b) 蓋部平面図

図－2 配筋図



写真－1 実験状況



図－3 ターゲットマーカー

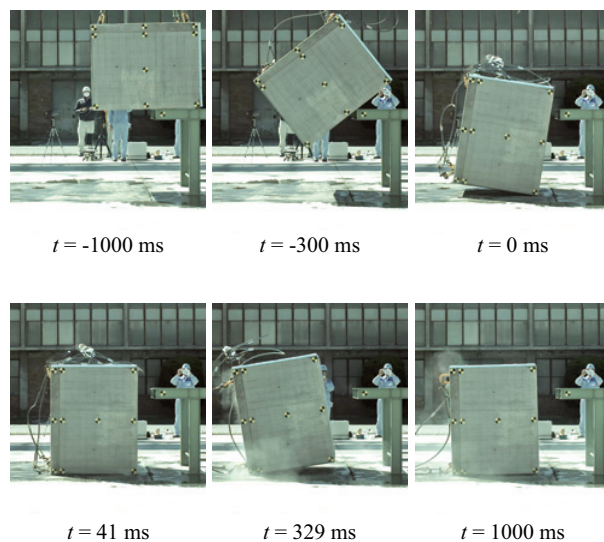
ネジ部呼び径 M20、長さ  $L = 110$  mm のボルトを用いた。実験時におけるコンクリートの圧縮強度  $f'_c$  は 58.3 MPa であった。なお、容器内には内容物に焼却灰を想定してフレコンバック内にフライアッシュ（質量 600 kg）を詰めたものを 2 体（総質量 1,200 kg）格納した。

## 2.2 実験方法および測定項目

写真－1 には、落下実験状況を示している。実験は、無筋コンクリート底版（厚さ 200 mm、以降コンクリート底版）に固定した鋼製架台の上面に RC 製容器を 800 mm 程度せり出した状態で設置し、自由落下させることにより実施した。鋼製架台の高さは、参考文献 3) の試験方法に準拠して 1.2 m とした。自由落下は、容器を吊り上げているワイヤーロープを切断することによってさせた。なお、ワイヤーロープの切断はディスクサnderを遠隔操作によって作動させて行った。

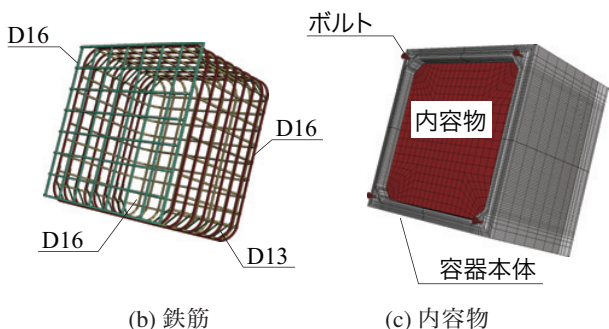
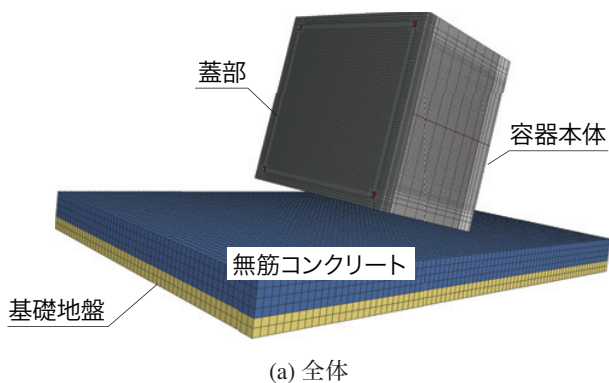
本研究では、容器の落下状況や内容物の漏洩を詳細に確認するために、解像度  $1024 \times 1024$  (dpi) の高速度カメラ（1,000 枚/秒）を 2 台用いて画像計測を行った。なお、容器各点の移動量  $\delta$  は、容器に予め貼り付けたターゲットマーカーから画像解析により算出した（図－3 参照）。また、実験終了後には容器内外面のひび割れ状況を記録した。

写真－2 には、容器の落下状況を示している。なお、高



写真－2 落下状況

速度カメラの映像より、容器がコンクリート底版に衝突した時刻を  $t = 0$  としている。写真より、容器は h 点側から底版に衝突し、その後  $t = 41$  ms で蓋部側（a, d 点）が衝突していることが確認される。容器はさらに反時計方向に回転し、 $t = 329$  ms においてリバウンドが最大となり、その後前後（左右）に振動しながら静止している。



図－４ 有限要素モデル

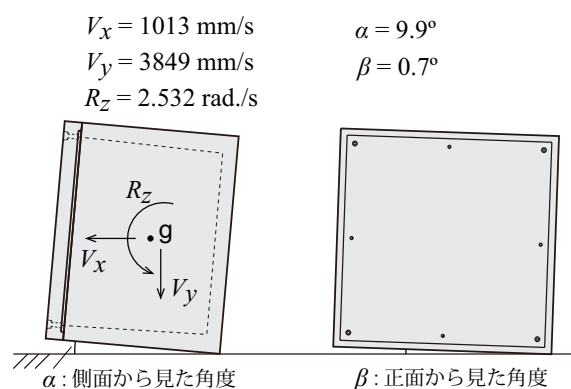
### 3. 数値解析概要

#### 3.1 有限要素モデルおよび解析方法

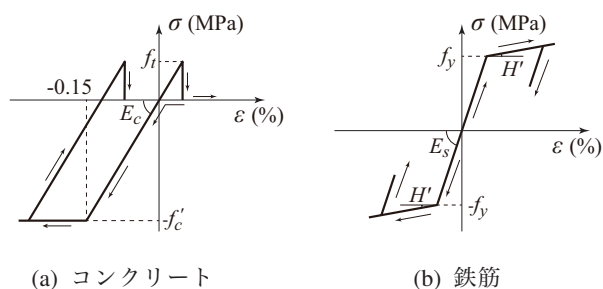
図－４には、本数値解析で用いた RC 製容器および鉄筋の要素分割状況を示している。使用した要素モデルは全て 8 節点固体要素である。本解析では、蓋部にあるアンカー筋および本体に埋設されている高ナットインサート (M20×160) を除いた全ての鉄筋 (D10, D16) やボルト (M20×110) を詳細にモデル化した。なお、内容物に関しては容器内に均等に格納されるものと仮定した。総節点数および総要素数は、それぞれ約 351,000、約 352,000 である。

境界条件に関しては基礎地盤底面を完全固定としている。本解析では、容器表面－コンクリート底版上面間および蓋部側底面－容器側上面間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面 (摩擦係数: 0.4<sup>6)</sup>) を定義している。また、コンクリート－鉄筋要素間については完全付着と仮定した。

数値解析は、図－５に示すように高速度カメラによる画像解析より得られた衝突時の容器重心位置 (g 点、図－３参照) における鉛直および水平方向速度 ( $V_x$ ,  $V_y$ )、および重心位置における回転速度 ( $R_z$ ) を容器に初期条件として与えることにより実施している。なお、図－５における衝突時の角度  $\alpha$ ,  $\beta$  は 2 台の高速度カメラの映像分析によって算出した。図から分かるように容器は、正面から見て約 0.7° 傾いてコンクリート底版に衝突している。なお、本解析では重力を考慮している。また、減衰定数  $h$  は質量比例分のみを考慮するものとし、予備解析の結果を



図－５ 解析における初期条件



図－６ 材料物性モデル

踏まえ、容器の鉛直方向最低固有振動数に対して  $h = 10\%$  と設定した。

#### 3.2 材料構成則

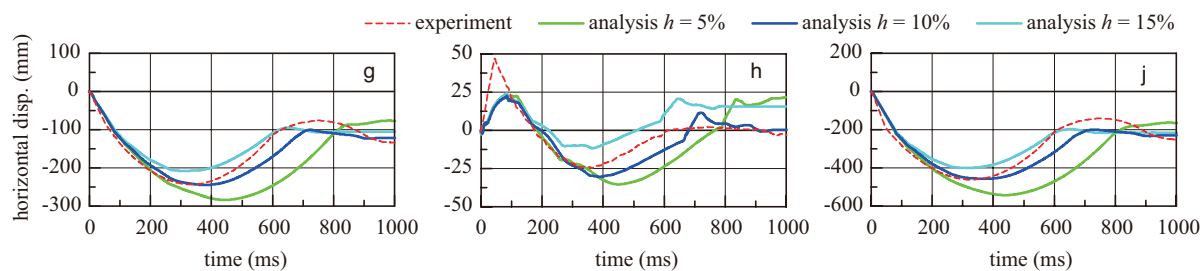
図－６には、本数値解析で用いたコンクリートおよび鉄筋の応力－ひずみ関係を示している。

図－６(a)には、コンクリートに関する応力－ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが 1,500  $\mu$  に達した時点でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。また、引張側に関しては、引張強度に達した段階で、応力を完全に解放するものとしている。なお、引張強度は RC 梁に関する重錘落下衝撃応答解析時<sup>7)</sup>と同様に圧縮強度の 1/10 と仮定した。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用し、内部摩擦角を 30°と仮定している<sup>8)</sup>。各物性値は、圧縮強度  $f'_c$  に関しては前述 (2.1 節) のとおりであり、ポアソン比  $\nu_c = 0.167$  とした。

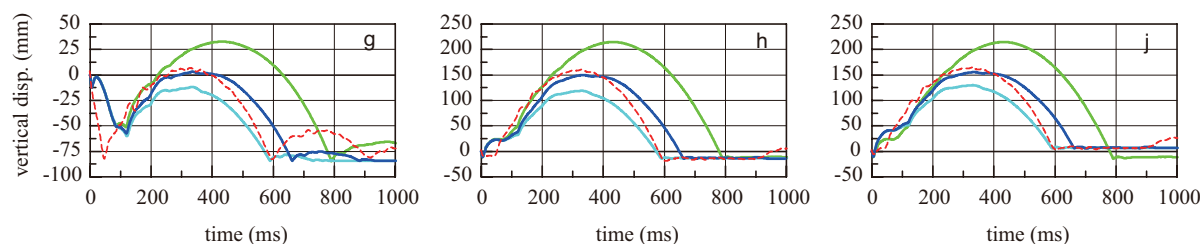
図－６(b)には、鉄筋に関する応力－ひずみ関係を示している。材料構成則には、塑性硬化係数  $H'$  を弾性係数の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用した。なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件式を採用している。各物性値は、弾性係数  $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、ポアソン比  $\nu_s = 0.3$  と仮定した。なお、降伏応力  $f_y$  に関しては公称値である  $f_y = 345 \text{ MPa}$  を用いた。

容器内のフライアッシュに関しては、総質量を 1,200 kg とし、便宜的に柔らかい弾性体 (弾性係数  $E_f = 1 \text{ MPa}$ 、ポアソン比  $\nu_f = 0.49$ ) でモデル化した。また、単位体積質量



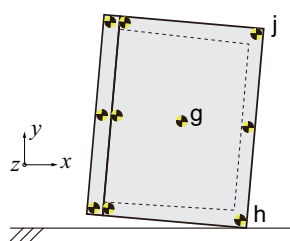


(a) 水平 (x) 方向変位



(b) 鉛直 (y) 方向変位

図－7 容器の代表的な点 (g, h, j 点) における変位時刻歴波形



図－8 変位着目点と座標系



写真－3 実験終了後における容器内の状況

は総質量を内容物の体積で除すことにより設定した。

コンクリート底版に関しては、容器落下後にひび割れの発生が確認されていること、および施工記録を参考に圧縮強度を  $f'_c = 15 \text{ MPa}$  とする弾塑性体と仮定した。なお、構成則は容器と同じモデル (図－6a 参照) を使用している。また、基礎地盤に関しては容器落下後にコンクリート底版に沈下が確認されていないことより、弾性体 ( $E_g = 1,000 \text{ MPa}$ ) と仮定した。

#### 4. 数値解析結果および考察

##### 4.1 容器の落下後における動的挙動性状

図－7 には、数値解析結果から得られた容器の代表的な 3 点 (図－8 参照) における変位時刻歴波形を実験結果と比較して示している。なお、図には減衰定数  $h$  が落下挙動に与える影響を確認するために、 $h = 5, 10, 15 \%$  の結果についても示している。横軸の時間軸は容器がコンクリート底版に衝突した時刻を零としている。また、各点の変位は容器が底版に衝突した位置を座標原点としている。図より、数値解析における容器の動的挙動は減衰定数により大きく異なり、実験結果を適切に再現可能な減衰定数は  $h = 10 \%$  であることが分かる。これより、以後

の考察は  $h = 10 \%$  の結果を対象に行うこととする。

まず、(a) 図に示す水平方向変位波形に着目する。重心位置近傍である g 点の実験結果は、写真－2 から分かるように容器底面が底版に衝突後、容器の回転とともに蓋部が底版に衝突するため、変位は徐々に減少しており約 329 ms で最小値を迎え、その後増大していることが分かる。一方、数値解析結果を見ると、変位の最小値を示す時刻に若干の差異が見られるものの、衝突初期からの変位の減少傾向は非常によく一致している。この傾向は j 点もほぼ同様である。しかしながら、衝突点近傍の h 点の場合には、実験結果では約 45 ms 程度で最大値を示し、その後変位が減少し 330 ms 程度で最小値を示している。一方、解析結果の最大値は実験結果と比較して小さく、またその発生時刻も遅くなっているものの、全体的には実験結果を大略再現できているものと判断される。

次に、(b) 図の鉛直方向変位波形に着目すると、重心位置近傍の g 点では、衝突時から約 100 ms までは数値解析結果と実験結果に差異が見られるものの、それ以降の波形性状は大略一致している。h, j 点の場合においても衝突初期に若干の差異が確認されるものの、最大変位量や波形性状はほぼ一致していることがわかる。

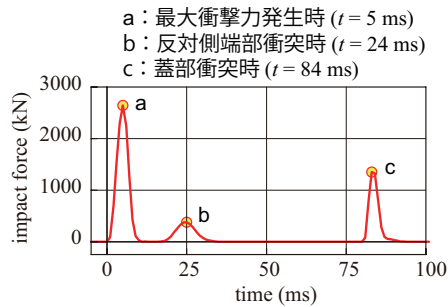


図-9 衝撃力波形

なお、衝突初期における数値解析結果と実験結果の差異の理由として、内容物の影響が挙げられる。すなわち、落下実験ではフレコンバック2体を容器内に格納していることより、容器内にはある程度のすき間が生じている。このため、容器落下時や衝突時にフレコンバックが容器内で大きく変形するとともにフライアッシュの空隙が減少し体積が小さくなるのに対し、数値解析ではこれらの影響を考慮せずに、内容物は容器内に均等に格納するようにモデル化したことによるものと推察される。写真-3には、実験終了後における容器内の状況を示している。写真より、内部のフレコンバックは衝突側に大きく変形している様子が確認できる。

#### 4.2 最大重錘衝撃力とひび割れ進展状況

図-9には、解析結果から得られる衝撃力波形を示している。なお、衝撃力は容器とコンクリート底版間の接触反力として評価している。図より、容器に作用する衝撃力は、容器衝突後から100 msまでの間に3回発生していることが分かる。すなわち、(a)片側底部が床版に衝突時、(b)容器反対側端部の衝突時、および(c)蓋部衝突時である。また、最大衝撃力は約2,500 kNであることが分かる。

図-10には、図-9に示す3時刻における鉄筋の主ひずみおよび容器の第1主応力分布図を示している。なお、図-6(a)で仮定したコンクリートの材料構成則に基づいてひび割れ発生位置を特定できるようにするために、第1主応力が零近傍応力( $\pm 0.001$  MPa)状態を示す要素を赤色で示している。

(a)図より、最大衝撃力を示す $t=5$  msでは、容器の側面に衝突点から斜め $45^\circ$ のひび割れが発生している様子が伺える。また、蓋角部にもひび割れが発生している。一方、鉄筋に着目すると、容器のひび割れ箇所に対応する位置に $200 \mu$ 以上のひずみが発生しており、両者は対応していることが分かる。(b)図に示す反対側端部衝突時( $t=24$  ms)を見ると、鉄筋に生じる主ひずみは小さく、また容器のひび割れも進展していないことが分かる。蓋部が衝突する $t=84$  msの場合(図参照)には、蓋隅部近傍の鉄筋に最大で $1,000 \mu$ を超える主ひずみが発生し、またそれに対応するように容器にもひび割れが発生している。

図-11には、実験終了後のひび割れ分布および数値解

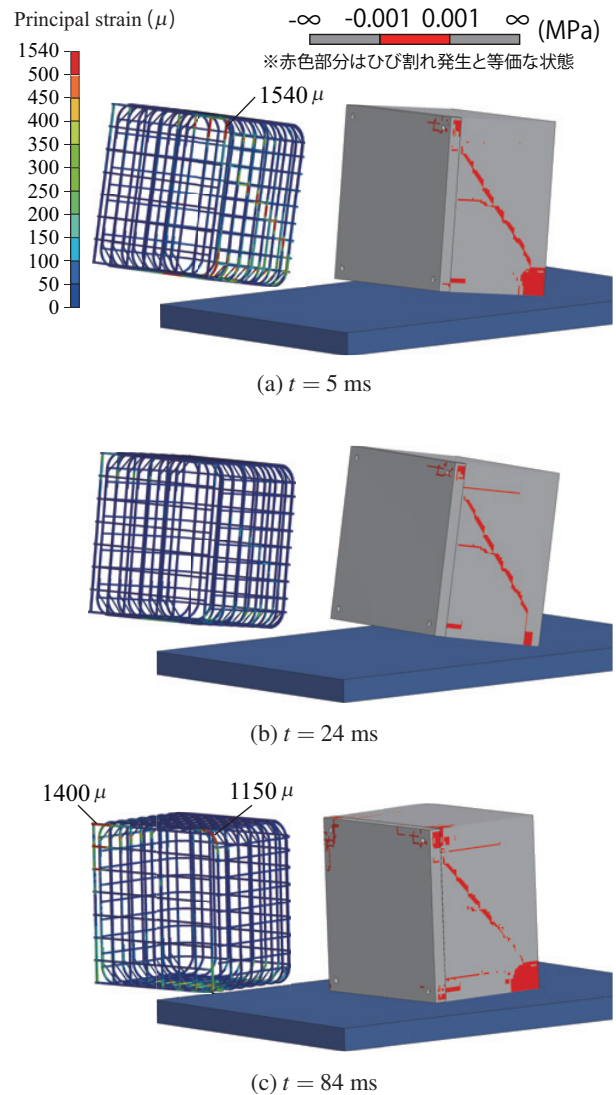
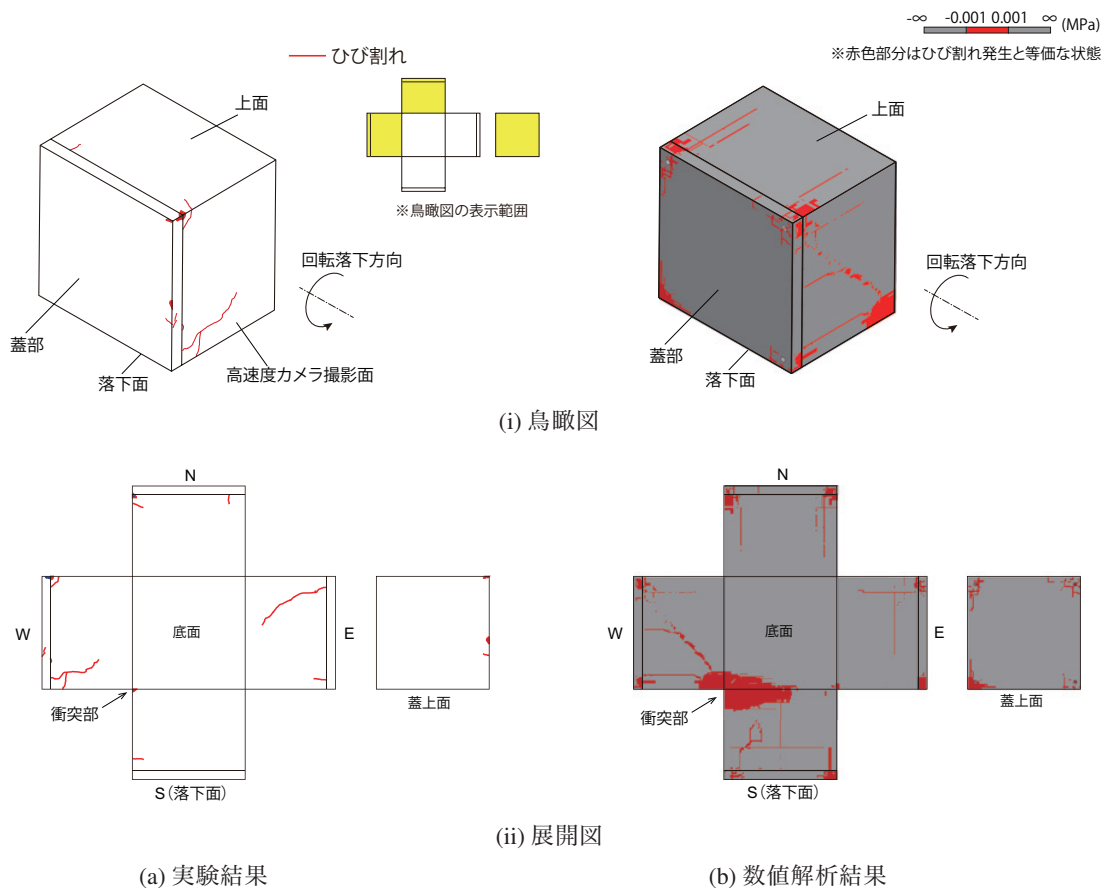


図-10 鉄筋の主ひずみおよび容器の第1主応力分布

析結果における第1主応力図を示している。ここでは、紙面の都合上、外面のひび割れ分布の結果を示している。

図より、数値解析結果は、前述のように衝突部から側面に斜めひび割れが生じているものの、実験結果ではそのようなひび割れは観察されていない。これは、実験では衝突部近傍が局所的に破壊(剥落)し衝撃エネルギーを吸収しているのに対し、解析結果ではこの現象を考慮していないことによるものと推察される。また、数値解析結果では、蓋部に多数のひび割れが発生しているのに対し、実験結果ではそのようなひび割れは確認されていない。これは、数値解析モデルにおいてアンカー筋や高ナットインサートをモデル化していないことより、実際よりも蓋隅部の剛性を小さく評価していることによるものと考えられる。なお、両者のひび割れ分布を全体的に比較すると、数値解析結果の方が実験結果と比較して衝突部や蓋隅部にひび割れの発生が多いものの、全体的には実験結果のひび割れ分布をほぼ適切に評価しているものと考えられる。



図－11 ひび割れ分布の比較

## 5. まとめ

本論文では、放射性廃棄物を保管対象としたRC製容器の落下抵抗性を確認するために実施した衝撃実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検証した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようである。

- 1) 提案の数値解析モデルを用いることにより、衝突後のRC製容器の動的挙動をほぼ適切に再現可能である。
- 2) RC製容器に発生したひび割れ状況に関しては、実験結果と比較して衝突部や蓋隅部に多く生じているものの、全体的にはほぼ適切に評価可能であることが明らかとなった。

## 謝辞

本数値解析を実施するにあたり、室蘭工業大学構造力学研究室の田中優貴君に多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) 鈴木裕介, 藤倉裕介, 木村健一, 李有震, Sanjay PAREEK, 荒木慶一: 震災ガレキ再生コンクリートを用いた放射能による汚染物格納容器の開発, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, Vol. 67, CS4-012, pp. 21-22, 2012.9
- 2) 橘 修, 畑中 貢, 坂井 悟, 大久保英也: 放射性物質汚染廃棄物の仮置保管施設の開発(その2), 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, Vol. 67, VI-507, pp. 143-144, 2012.9
- 3) 文部科学省: 放射性同位元素等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告知, 告示第58号, 最終改正平成23年3月28日
- 4) 多田克彦, 河野克哉, 東洋 輔, 小室雅人, 栗橋祐介, 川瀬良司: 放射性廃棄物を保管対象とした鉄筋コンクリート製容器の落下抵抗性, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 1290-1299, 2016.3
- 5) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- 6) British Standards Institution, BS 5975: 1996: Code of Practice for Falsework, London, 1996.3
- 7) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩: RC梁の繰返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol. 55A, pp. 1225-1237, 2009.3
- 8) 玉木美帆, 岸 徳光, 今野久志, 川瀬良司: 矩形RC版の耐衝撃挙動解析におけるコンクリートに関する降伏条件式の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 757-762, 2010.7