鋼製容器で被覆した鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリート製保管容器の落下解析

室蘭工業大学大学院	学生会員	○田野　順也	室蘭工業大学大学院	正会員	小室　雅人
太平洋セメント(株)	非会員	石田　泰之	太平洋セメント(株)	正会員	本間　健一
(株)太平洋コンサルタント	正会員	渋谷　和俊	(株)太平洋コンサルタント	非会員	小森　久幸
東京パワーテクノロジー(株)	非会員	佐藤　祐輔	マテラス青梅工業(株)	正会員	岡本　賢治

1. はじめに

本研究では，放射性物質に汚染された廃棄物を安全に運搬・保管する目的で，新たに開発された鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリート(SFPIC)製容器に，鋼製容器を被覆した保管容器を対象に，落下解析を実施した．得られた解析結果を落下試験結果と比較することにより，解析モデルの妥当性を検証するとともに，その安全性について検討を行った．

2. 実験概要

図1には，保管容器の形状寸法を示している．保管容器は，SFPIC 製容器(容量：1 m^3)の外部を鋼製容器(ステンレス)で被覆したものである．また，落下時の衝撃を緩衝する目的で容器底部に高さ 30 mm の緩衝リングを設置し，SFPIC 製容器と鋼製容器の間隙部には弾性係数が比較的小さい高流動モルタルを充填した．なお，SFPIC は普通コンクリートに比べて，気密性，化学的安定性に優れており，塩化系廃棄物などの物質でも漏洩を防止することが分かっている．

容器の外寸は，胴体部外径 1,350 mm，高さ(鋼製蓋を含む) 1,465 mm である．容器の厚さは，鋼製容器，充填材および SFPIC 製容器において，それぞれ 10，30 および 60～80 mm である．容器と蓋部の締結は，呼び径 M16(長さ 90 mm) のステンレス製ボルトを用いた．また，SFPIC 製容器および蓋には，呼び径 ϕ 9 の鉄筋(高張力鋼)を埋め込んでいる．試験体の重量は 2.4 tf である．

2.1 試験方法

図2には，想定した落下条件および実際の試験状況を示している．落下試験は，放射性廃棄物の保管施設内において，容器を最大 3 段積み上げる際に事故が発生し，容器が正立状態で垂直自由落下するものと想定し，落下高さを 3.5 m と設定した．落下試験は，容器をクレーンにより所定の高さに吊り上げた後に，ワイヤロープを切断することで，剛基礎(基礎コンクリート上に厚さ 40 mm の鋼板を設置)上に落下させた．また，容器の落下状況を詳細に確認するために，高速度カメラを用いて画像計測を行った．

試験後における容器の健全性に関しては，1) 落下直後に目視による外観観察，および 2) 容器を満水にして 24 時間以上経過した後に漏水の有無から判断した．また，漏水の有無を判断した後，鋼製蓋および SFPIC 製蓋を取り外し，容器内部のひび割れ状況を確認した．

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデルおよび解析手法

図3には，有限要素モデルの要素分割状況を示している．鉄筋は埋め込み鉄筋要素，ボルト部は 2 節点はり要素，鋼製蓋の一部および鋼製繊維(SF)は 4 節点シェル要素，それ以外は 8 節点固体要素を用いた．また，SFPIC のモデル化に関しては，鋼製繊維の補強効果を解析的に考

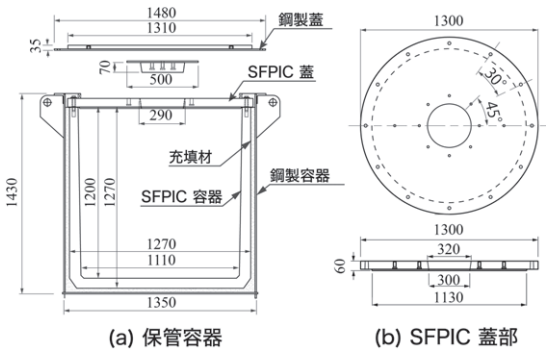


図1　保管容器の形状寸法

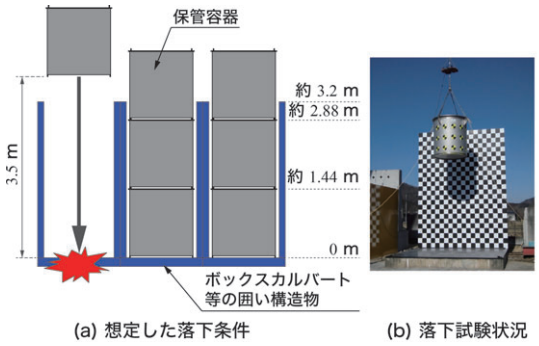


図2　落下試験の様子

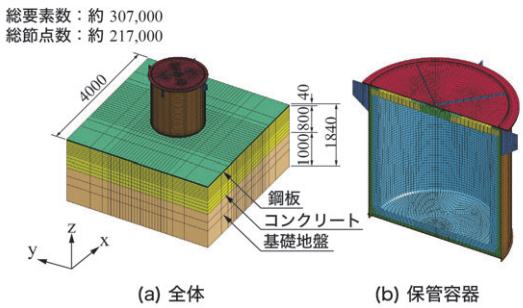
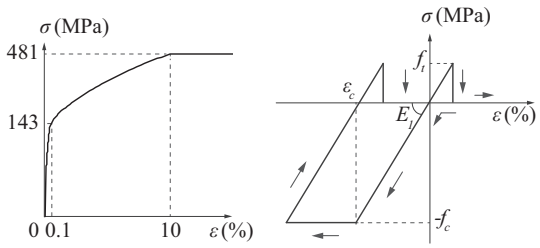


図3　有限要素モデル

キーワード：落下解析，落下抵抗性，ポリマー含浸コンクリート，PIC 容器，放射性廃棄物
連絡先：〒 050-8585　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　TEL/FAX　0143-46-5228



(a) ステンレス　　(b)PIC，充填材

図 4　材料構成則

表 1　材料物性値

材料	密度 ρ (g/cm^3)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
ステンレス	7.93	-	157	0.3
SFPIC	2.45	150	38	0.22
充填材	1.54	40	11	0.243

慮するために，SFPIC 要素内にシェル要素として配置した．なお，補強量は試験条件と同じく SFPIC 要素の体積に対して 1.5 % とした．解析は，容器全体に高速度カメラより算出された実測衝突速度を初速度として付加することで実施した．剛基礎部は，鋼板，コンクリートおよび基礎地盤を完全付着とし，側面の法線方向の変位を拘束し，底面を完全固定とした．

3.2 材料構成則

図 4 には，本解析に用いたステンレス，SFPIC および充填材の応力－ひずみ関係を示している．また，**表 1** には，各材料の物性値を一覧にして示している．

(a)図には，ステンレスの応力－ひずみ関係を示している．ここでは，複合 Ramberg － Osgood 曲線を用いた材料構成則を適用した．また，鉄筋には，降伏後の塑性効果を考慮したバイリニア型の応力－ひずみ関係を与えている．なお，本解析ではステンレスおよび鉄筋にはひずみ速度効果を考慮した．

(b)図には，SFPIC および充填材の応力－ひずみ関係を示している．既往の研究成果を踏まえ，圧縮側にはバイリニア型，引張側には最大主応力が引張強度 f_t(圧縮強度の 1/10)に到達後，応力がゼロ(カットオフ)となるモデルを用いた．

4.　数値解析結果及び考察

4.1 保管容器の落下後における動的挙動性状

図 5 には，数値解析結果から得られた容器の鉛直方向変位の時刻歴応答波形を試験結果と比較して示している．

図より，試験結果を見ると，衝突後 90 ms で最大となる正弦半波状の波形を示している．なお，落下高さ 3.5 m に対する容器の最大リバウンド量は，35 mm 程度と非常に小さいことが分かる．一方，数値解析結果では，リバウンドの立ち上がり時刻に差が見られるもの，最大リバウンド量に関しては試験結果とよく一致していることが分かる．

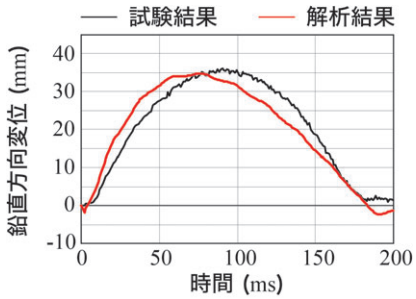


図 5　保管容器側面における変位時刻歴応答波形

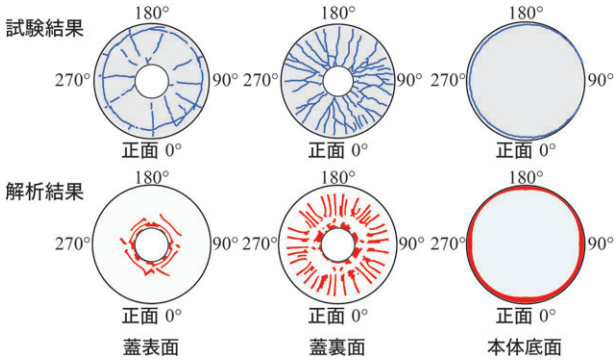


図 6　試験結果および数値解析結果のひび割れ状況

4.2 SFPIC 製容器内部におけるひび割れ状況

図 6 には，SFPIC 製容器のひび割れ状況(蓋の表裏面，本体底面)について試験結果と解析結果を比較して示している．なお，容器の側面にはひび割れが確認されていない．

試験結果では，蓋の表面および裏面ともに放射状の微細なひび割れが，また容器底面にはハンチ部近傍全周に渡る大きなひび割れが確認された．なお，容器の外側には亀裂等の損傷は確認されず，漏水も無いことから容器としての安全性は確保されていることを確認している．一方，数値解析結果を見ると，蓋表面については必ずしも試験結果と一致していないものの，蓋裏面および本体底面については試験結果と同様な性状のひび割れが発生している．全体的なひび割れ状況を比較すると，蓋表面のひび割れ状況は試験結果を過小に評価しているものの，それ以外は試験結果をほぼ適切に再現しているものと考えられる．なお，数値解析結果より容器に発生するひずみは，比較的小さく，容器としての安全性は確保されていることを解析的に確認した．

5.　まとめ

本研究では，新たに開発された鋼製容器で被覆した鋼繊維補強ポリマー含浸コンクリート製保管容器の落下解析を実施した．その結果，1) 衝突後の容器の動的挙動をほぼ適切に再現可能であること，2) 容器内部のひび割れについては，蓋表面において試験結果を過小評価する傾向にあるものの，全体的にはほぼ適切に再現可能であること，また 3) 数値解析結果からは有害な損傷が確認されないことから，試験結果と同様に，容器としての安全性を数値解析的に確認した．