

ポリウレア樹脂を塗布したRC版の 繰返し中速度衝撃荷重下における耐衝撃性能に関する検討

Impact resistance of RC slabs coated with polyurea resin subject to repeated medium-speed impact

井福達也*, 園田佳巨**, 玉井宏樹***, 興石正己****
Tatsuya Ifuku, Yoshimi Sonoda, Hiroki Tamai, Masami Koshiishi

*九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

**工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

*** 工博, 九州大学大学院助教, 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

**** 工博, 日本工営株式会社, 交通運輸事業本部 (〒102-8539 東京都千代田区麹町 5-4)

キーワード: ポリウレア樹脂, 衝撃実験, FEM, RC版
Keywords: Polyurea resin, impact experiment, FEM, RC slab

1. 緒言

ポリウレア樹脂はイソシアネートとポリアミンを二液混合スプレーでウレア結合させ、構造物表面に生成させたもので、高い強度と高い伸び性能の双方を併せ持つ。さらに、保水性や耐摩耗性、耐薬品性、耐衝撃性などにも優れることから、様々な構造物のコーティング材料として広く利用されている。特に、大変形領域において大きな復元力特性を発揮できる特徴から、コンクリート構造物や鋼構造物の耐衝撃性および耐爆性を向上させるための応用例がある。市野ら²⁾は、ポリウレア樹脂で裏面補強したコンクリート版の接触・近接爆発に対する耐爆性能について実験的に検討し、コンクリート版に対する裏面補強が局部破壊の低減に有効であることを確認した。

他にもポリウレア樹脂を塗布したコンクリート版の耐衝撃性・耐爆性について様々な研究^{3),4)}が行われているが、いずれも高速度の衝撃荷重や爆風荷重下の応答に関するものが多く、中速度の衝撃荷重下の応答に関する研究例は少ない。また、ポリウレア樹脂を塗布したRC部材に関する数値シミュレーションを実施した研究例は少ない。そこで本研究では、ポリウレア樹脂を塗布したRC版に中速度(10m/sec程度)の繰返し衝撃荷重を与え、コンクリート版構造に対するポリウレア樹脂の補剛効果や局部破壊抑制効果の把握などを目的とした実験を行った。さらに、これに関する有限要素法(FEM)を用いた数値シミュレーションを行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

(1) ポリウレア樹脂

本研究で用いるポリウレア樹脂の材料特性値は、ダンベル試験体を用いた引張試験により調べた。JISA6021「建築用塗膜防止材」に準拠して作成したシートからダンベル試験体3号形を打ち抜き、標点間距離20mm、引張速度50mm/minで試験を行った。得られた試験結果を図-1に示す。また、ポリウレア樹脂とコンクリートの付着力に関する検討には、下処理したコンクリートにプライマーを塗布し、さらにポリウレア樹脂を2mmの厚さで塗布する。養生後、ばねばかりを介して90°上方(鉛直方向)に引張ピーリング試験を実施した。ピーリング試験の結果、付着強度は1.0N/mmという結果が得られた。

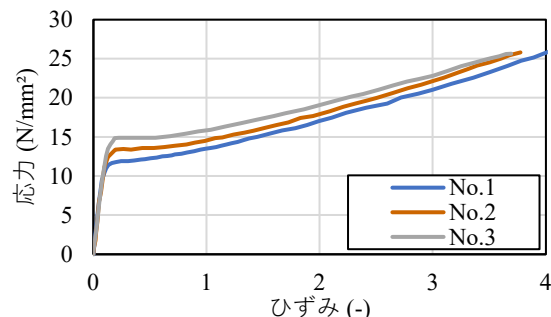


図-1 ダンベル試験結果

(2) 試験体の種類と作成方法

本実験では、ポリウレア樹脂による被覆効果を基礎的に把握するために、表面、裏面を被覆したRC版と無被

覆の RC 版の 3 種類を用いて、中速度の飛翔体に対する耐衝撃性能を比較・検討した。試験体の形状、寸法を図-2 に示す。試験体は正面から見て正方形とした版で、縦 600mm×横 600mm×高さ 90mm である。また、コンクリートの配合を表-1 に示す。内部鉄筋は D6 (SD295A) を用い、125mm 間隔に縦横 5 本ずつ、計 10 本を引張側に用いた。ポリウレア樹脂の塗布方法として、まず RC 版の樹脂塗布面をディスクサンダーで研磨した後、二液無溶剤型エポキシ樹脂のプライマーを所定量はけで塗布した。プライマー硬化確認後、専用のスプレー機械にて、主剤である 2 液無溶剤型ポリウレア樹脂を吹き付けた。また、ポリウレア樹脂の塗布は、針貫入式膜厚計で塗膜の厚みを計測しながら行い、所定の 2mm の厚みになるように塗布した。吹き付け時の様子を写真-1 に示す。

2.2 衝突実験装置および計測方法

衝突実験には、写真-2 に示す超高速水平衝撃力荷重実験装置を用いた。本実験では、直径 50mm、質量 3kg、先端形状が平面の飛翔体を本装置から発射し、上下端を 500mm の支点間距離で二辺支持された試験体に衝突速度 10m/sec の一定速度で繰り返し衝突させた。繰り返し载荷は安全面を考慮し、試験体が裏面剥離、又は衝突部の圧縮破壊が進行し内部鉄筋に到達するまでを計測した。二辺支持された試験体の様子を写真-3 に示す。

衝撃荷重の計測においては、高速ビデオカメラにより衝突前後の飛翔体の変位時刻歴を記録し、2 回微分して求めた加速度に飛翔体質量を乗じて荷重に換算した。なお、解像度 26 万画素 (横 512×縦 512)、撮影速度 10000 フレーム/秒の高速ビデオカメラを用いた。支点反力については、試験体裏面にロードセルを 4 個設置して計測した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

高速衝突後の最終载荷時の試験体の表面、裏面の状況を写真-4 に示す。写真とともに示した貫入深さ、裏面剥

離深さ、試験体裏面のポリウレア樹脂の盛り上がり高さは計測した値の最大値とした。

無被覆の試験体は 5 回目の载荷で、鉄筋かぶり部のコンクリートが裏面剥離する破壊を生じた。一方、表面にポリウレア樹脂を被覆した試験体は、5 回の载荷では裏面に変状は見られず、10 回目の载荷で裏面にコーン状の剥離が生じる破壊に至り、破壊に要する衝突回数は 10 回まで増加した。裏面被覆試験体では、载荷 6 回目にポリウレア樹脂内部において裏面剥離が生じたことを、裏面の盛り上がりにより確認した。しかし、裏面のポリウレ

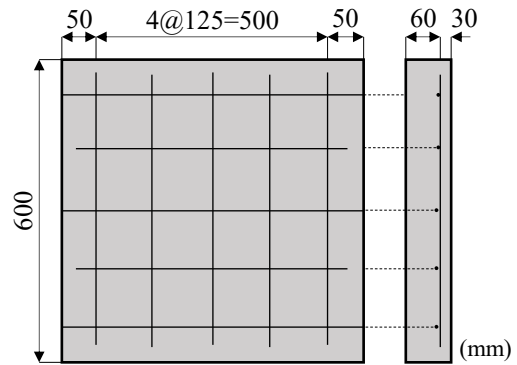


図-2 RC 版の形状・寸法

表-1 コンクリート配合

| 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | |
|------------|----------|--------------------------|------|-----|-----|
| | | 水 | セメント | 細骨材 | 粗骨材 |
| 66.5 | 48.6 | 171 | 257 | 887 | 972 |



写真-1 吹付けの様子

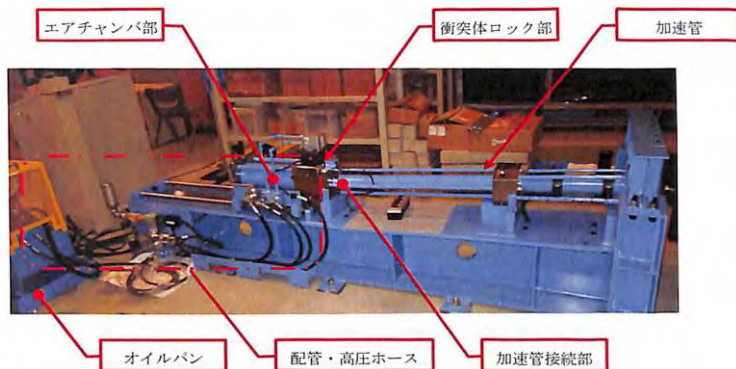


写真-2 実験装置



写真-3 支持の様子




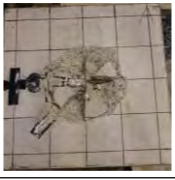

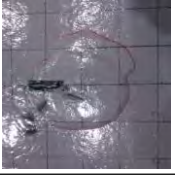
| 実験ケース | 実験結果 | | | 破壊時の 載荷回数 | 備考 |
|-------------|--------------------------------------|---|---|--------------|---|
| | 破壊形式 | 表面状況 | 裏面状況 | | |
| 無被覆 試験体 | かぶり部の 裏面剥離 |  |  | 5 | 表面くぼみ:2mm 裏面剥離面積 :7500mm ² 裏面盛り:45mm |
| 前面被覆 試験体 | コンクリートの コーン破壊 |  |  | 10 | 表面くぼみ:7mm 裏面剥離面積 :6250mm ² 裏面盛り:66mm |
| 裏面被覆 試験体 | かぶり部の裏面 剥離後に、 ポリウレア樹脂 の亀裂破壊 |  |  | 13 | 表面くぼみ:57mm 裏面剥離面積 :8750mm ² 裏面盛り:20mm |

写真-4 載荷後の試験体の破壊状況

ア樹脂がコンクリート片の飛散を防ぎ、試験体の破壊により実験を終了するまでに13回の載荷を要した。なお本ケースでの破壊形式は、内部鉄筋まで及ぶ貫入破壊と裏面のポリウレア樹脂の亀裂による破壊である。以上より、ポリウレア樹脂を表面および裏面に被覆することで、RC版の破壊に要する載荷回数が大幅に増加することが認められた。

3.2 衝撃荷重および支点反力

図-4 に高速ビデオカメラにより計測した衝撃荷重の時刻歴応答を示す。載荷1回目では、無被覆試験体と裏面被覆試験体の最大衝撃力にほぼ違いは見られなかった。載荷5回目では、衝突部の圧縮破壊および裏面剥離に伴う部材剛性の低下によりいずれのケースでも最大衝撃力が減少した。ただし、無被覆試験体は載荷1回目と比べて最大衝撃力が約55%減少したのに対し、裏面被覆試験体では約34%の減少に抑えられた。これは、ポリウレア樹脂が剥離片を断面内に保持することで、RC版全体の剛性低下を防いだためだと考えられる。

裏面側の支점에設置した4個のロードセルの計測値を合算して得られた、載荷1回目における支点反力の時刻歴応答を図-3に示す。ポリウレア樹脂を表面に被覆することで、RC版の最大支点反力を約41%低減できることがわかった。これは、ポリウレア樹脂の緩衝効果により、裏面側の支点到伝わる荷重が減少したためだと考えられる。また、裏面被覆試験体の最大支点反力も低減されているが、これはRC版とロードセルの間に低剛性のポリウレア樹脂が在るため、ロードセルに伝わる荷重が時間的に分散された可能性がある。

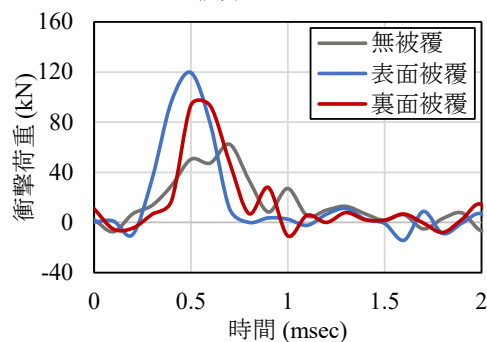
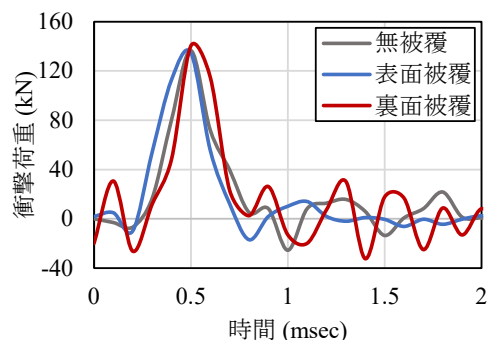


図-4 衝撃荷重の時刻歴応答

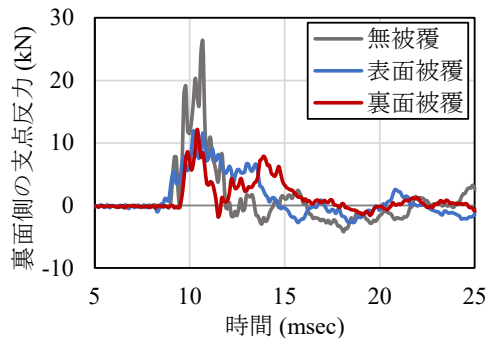


図-3 載荷1回目の時刻歴支点反力

4. 解析概要

ポリウレア樹脂の飛散防止効果を数値解析的に検討するために、無被覆試験体と裏面被覆試験体を対象として数値シミュレーションを実施した。ただし、本解析は基礎検討の段階であり、相対比較による被覆効果の評価に留める。

解析手法として、汎用有限要素解析ソフト DIANA10.5 を用いた 3 次元の非線形有限要素解析を行った。また、動的解析を行うにあたり、時間積分法はニューマーク β 法 ($\beta=0.25$)、陰解法の収束計算にはニュートンラプソン法を用い、さらに Rayleigh 減衰を導入した。

4.1 解析モデルおよび境界条件

解析には対称性を考慮した 1/2 部のモデルを用いた。その概要図を図-5 に示す。各種寸法は実験で用いた供試体と同様であり、内部鉄筋は埋込鉄筋トラス要素、その他は 3 次元ソリッド要素でモデル化した。

支持条件に関しては、実験同様二辺支持となるように図-6 に示す位置を固定した。ただし、裏面被覆モデルの裏面の支持は、ポリウレア樹脂裏面ではなく RC スラブ裏面を支持した。また、荷重条件に関しては、衝突面に直接衝撃荷重を入力することで繰返し衝撃載荷を行った。なお、実験同様に無被覆モデルに対しては 5 回、裏面被覆モデルに対しては 13 回の衝撃荷重を与えている。図-7 に本解析で入力した衝撃荷重を示す。衝撃荷重は、飛翔体の画像解析より算出した衝撃荷重の時刻歴波形を三角波形に近似して作成した。ここで、実験では衝突部近傍の圧縮破壊が顕著にみられたが、解析において載荷面要素の圧縮破壊を考慮した場合、圧潰した要素に衝撃荷重を入力することになり、衝撃荷重が適切に伝達されない問題が生じる。そのため、本解析では載荷面のコンクリート要素のみ圧縮軟化を考慮しないものとした。以上の仮定により、入力エネルギーが衝突面の破壊に消費されないため、裏面については安全側の評価になる。なお、衝突面の破壊を考慮しないため、入力する衝撃荷重は衝突面の破壊を想定したものであってはならない。そこで、図-7 に示すように、局所破壊の影響により低減された 5 撃目以降の衝撃荷重は不適とし、5 撃目以降は 4 撃目と同様の衝撃荷重を繰返し入力した。

4.2 材料特性および構成則

各材料に仮定した応力-ひずみ関係を図-8(a), (b), (c) に示す。

コンクリートには、分散ひび割れモデルを用いた。圧縮側には式 (1)~式 (4) によって定式化される「コンクリート標準示方書」に準拠した圧縮軟化モデルを適用した。ここで、 f'_{ck} を圧縮強度 (N/mm^2)、 ε をひずみ、 ε_c を圧縮強度時ひずみ、 E_0 を初期剛性 (N/mm^2)、 ε_p を塑性ひずみ、 K を弾性剛性残存率とした。ただし、圧縮強

度時ひずみ ε_c は、式(2)より逆算して定義した。

$$\sigma_c = E_0 K (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (1)$$

$$E_0 = 2f'_{ck} / \varepsilon_c \quad (2)$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) \right) \right\} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_c - 2.86 \cdot \varepsilon_c \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) \right\} \quad (4)$$

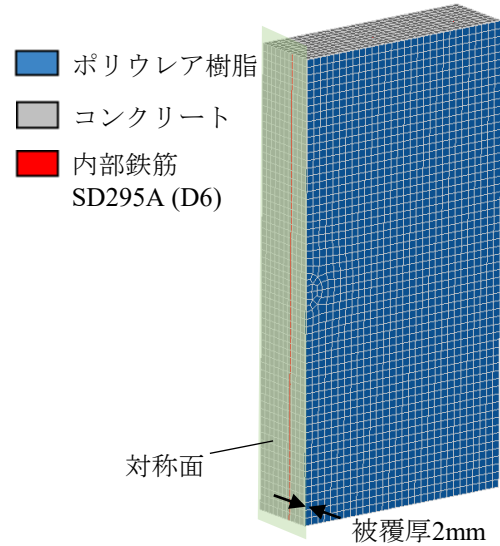


図-5 解析モデル概要図

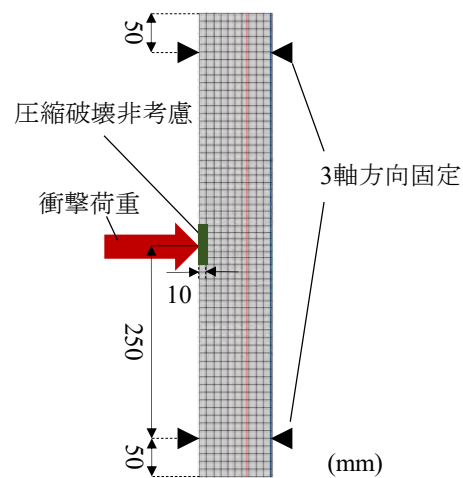


図-6 境界条件模式図

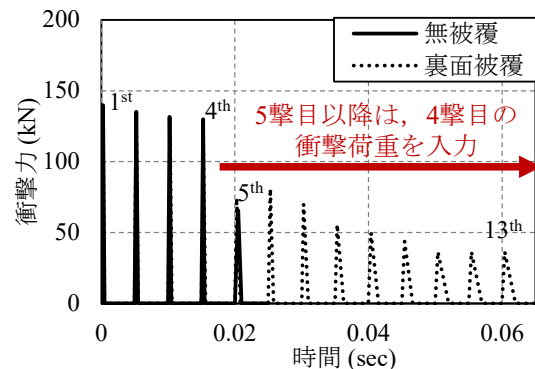


図-7 衝撃解析において入力した衝撃荷重

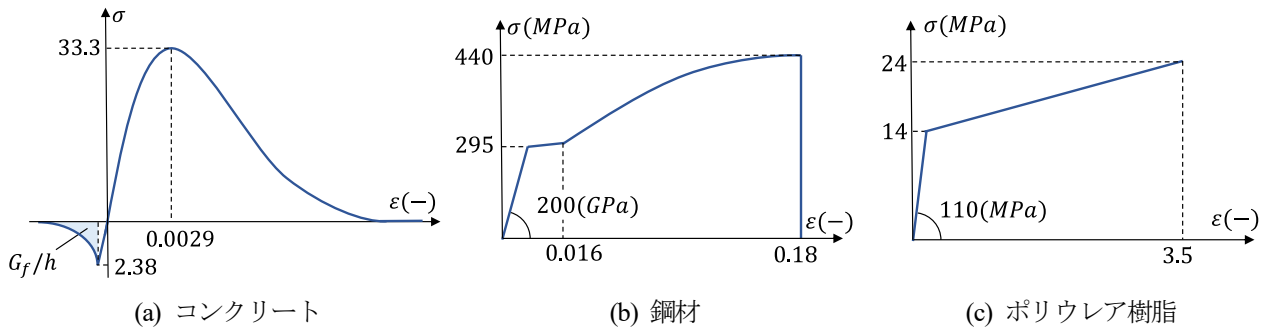


図-8 各材料の応力—ひずみ関係

表-2 各材料の物性値

| 材料 | 密度 [kg/m ³] | ヤング率 [GPa] | ポアソン比 [-] | 強度 [MPa] |
|---------|----------------------------|---------------|--------------|------------------------|
| 鋼材 | 7850 | 200 | 0.3 | 295 (降伏) |
| コンクリート | 2320 | 22.9 | 0.2 | 33.3 (圧縮) 2.38 (引張) |
| ポリウレア樹脂 | 1000 | 0.11 | 0.26 | 24.0 |

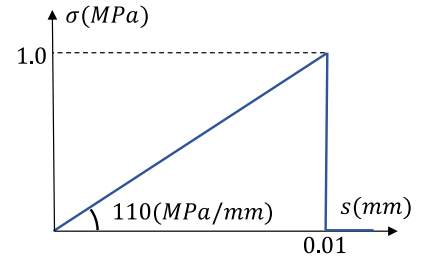


図-9 付着応力—相対変位関係

引張側は、引張強度までは線形弾性体と仮定し、引張強度以降は Hordijk モデルを適用した。このとき引張破壊エネルギーの導入により解析結果の要素寸法依存性を軽減させている。ここで、引張強度と破壊エネルギーは「コンクリート標準示方書」に従い、式 (5)、式 (6) により算出した。ただし、引張強度を f_t (MPa)、破壊エネルギーを G_f (MPa×mm)、粗骨材の最大寸法を d_{max} (mm) とし、また図-8(a)において等価要素長を h_{cr} (mm)、とする。なお、等価要素長 h_{cr} はそれぞれの要素に対して、要素体積の 3 乗根を適用した。また、コンクリートの多軸拘束状態を考慮するために、破壊基準として Selby-Vecchio モデルを用いた。

$$f_t = 0.23 f'_{ck} \quad (5)$$

$$G_f = 10 (d_{max})^{\frac{1}{3}} \cdot f'_{ck} \quad (6)$$

鋼材の構成則には Dodd-Restrepo モデルを用いた。Dodd-Restrepo モデルは、鉄筋の繰返し応力—ひずみ挙動を予測する巨視的モデルであり、バウシinger 効果や鉄筋の破断を考慮可能である。

ポリウレア樹脂には、図-1 に示すダンベル試験結果を近似して作成したバイリニアモデルを用いた。ポリウレア樹脂とコンクリートの境界面にはインターフェイス要素を設け、図-9 に示す付着応力—相対変位関係を適用している。インターフェイス要素に発生する応力が付着強度を上回る場合には伝達力をゼロとすることで、付着切れを表現した。初期剛性は弱剛性材料側のポリウレア樹脂の静弾性係数を採用し、付着強度はピーリング試験の結果より 1.0N/mm² とした。なお、インターフェイス

要素の圧縮方向には線形弾性を仮定している。

各材料の物性値を表-2 に示す。主に材料試験によって得られた値を用いた。なお、本解析では各材料のひずみ速度依存性は考慮していない。

5. 解析結果

無被覆・裏面被覆モデルの RC スラブ裏面とポリウレア樹脂裏面のひずみ分布を相対比較することで、裏面剥離防止効果および飛散防止効果の検討を試みた。

図-10 に無被覆・裏面被覆モデルのコンクリート裏面とポリウレア樹脂裏面の最大主ひずみ分布を示す。コンクリート裏面のひずみ分布を無被覆と裏面被覆のケースで比較すると、5 撃目において裏面被覆のケースの方が、損傷が小さいことがわかる。これより、ポリウレア樹脂を裏面に被覆することで、繰返し衝撃荷重下でのコンクリート裏面のひび割れ進展を抑制できることを確認した。

裏面被覆モデルの RC スラブ裏面のひずみ分布をみると、载荷回数が増加するにつれて裏面のひび割れが進展していることがわかる。これに伴い、ポリウレア樹脂裏面の損傷も進展するが、13 撃目におけるひずみの最大値は 1% 程度であり、破断ひずみ 350% には遠く及ばないことから、依然として伸び性能に余裕があることがわかる。以上より、コンクリート裏面に大きな裏面剥離が生じてもコンクリートの裏面外縁に健全なポリウレア樹脂が被覆されているため、剥離片の飛散を防止できることを間接的に示せた。

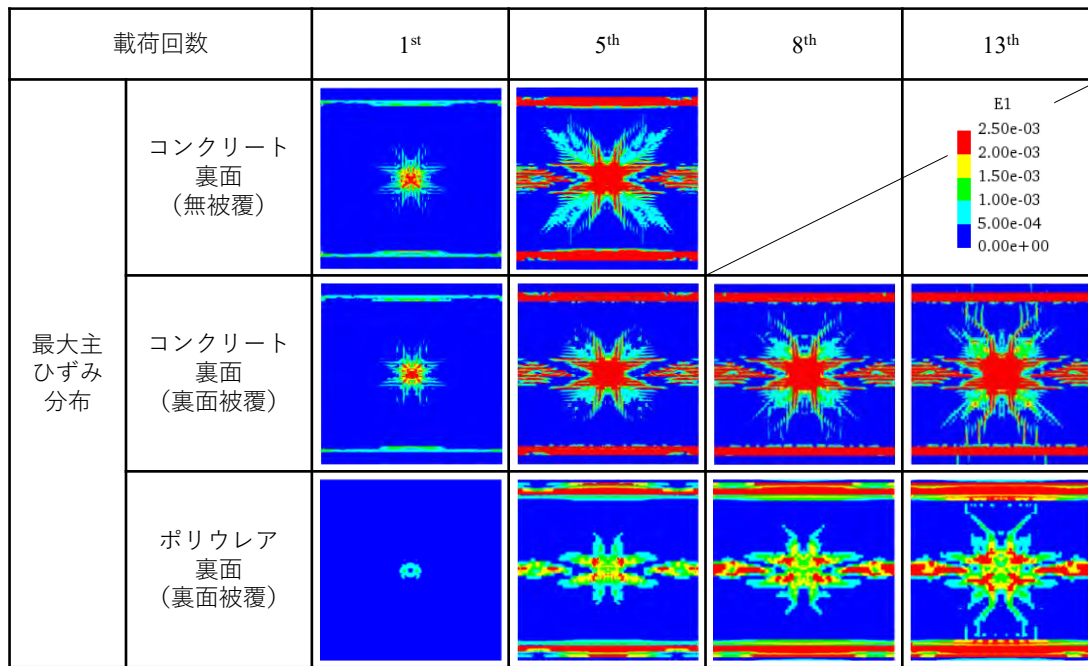


図-10 解析結果 (最大主ひずみ分布)

6. まとめ

本研究は、RC 版に対するポリウレタ樹脂の耐衝撃性向上効果について衝突実験と FEM 解析により検討したものである。本研究の成果を以下に要約する。

- 1) 10m/sec の一定速度で繰返し衝突実験を実施し、無被覆の場合は5撃目で裏面剥離により破壊され、表面被覆の場合は10撃目でコーン破壊、裏面被覆の場合は13撃目で貫入破壊とポリウレタ樹脂の亀裂破壊という結果が得られた。
- 2) ポリウレタ樹脂を表面に被覆することで、ポリウレタ樹脂の緩衝効果を確認できた。また、裏面に被覆することで、明確な飛散防止効果が確認できた。
- 3) FEM 解析により、ポリウレタ樹脂の裏面被覆によるコンクリート裏面のひび割れ抑制効果を明らかにした。

参考文献

- 1) 奥石正己, 高梨和光, 西村淳, 井出一直, 藤掛一典, 大野友則: ポリウレタ樹脂で表面被覆した RC 壁の衝撃挙動と樹脂被覆による安全性向上効果, 平成 26 年度全国大会 第 69 回年次学術講演会
- 2) 市野宏嘉, 永田真, 別府万寿博, 大野友則: 接触・近接爆発を受けるコンクリート板の局部破壊に対する裏面補強法とその効果, 土木学会論文集, E2, Vol.72, No.2, pp.146-164, 2016
- 3) Chen Y shun, Wang B, B Zhang, Q Zheng, Zhou J nan, Jin F nian, Hua lin Fan: Polyurea coating for foamed concrete panel: an efficient way to resist explosion, Def Technol, 16, pp.136-149, 2020
- 4) J.H. Ha, N.H. Yi, J.K. Choi, J.H. J Kim: Experimental study on hybrid CERP-PU strengthening effect on RC panels under blast loading, Compos Struct, 93, pp.2070-2082, 2011