

個別要素法によるポリウレア樹脂塗膜コンクリート円柱供試体の高速載荷解析

防衛大学校 学生会員 ○足立 国明 学生会員 原木 大輔 正会員 香月 智
ジャスト・フィット・マテリアル(株) 福井 秀平

1. 緒 言

コンクリート構造物が衝撃荷重を受けると、コンクリート片の飛散によって構造物内外部の人命および財産を脅かす二次被害の可能性があるが、それらの安全対策については確立されていない。そこで、著者らは近年コンクリートの補修・保護に使用されているポリウレア樹脂に着目し、その飛散抑止効果について検証するため、コンクリート円柱供試体にポリウレア樹脂を 1mm および 2mm 塗膜したものについて高速載荷実験を実施して、ポリウレア樹脂が飛散片の発生を抑止できることを確認した¹⁾。このような基礎的な実験成果をより実用的な技術に高めるには、適切な応答予測もしくは設計技術の開発が望まれる。そこで本研究は、三次元個別要素法によるポリウレア樹脂塗膜コンクリート供試体の高速載荷シミュレーションを試み、実験結果と比較検討したものである。

2. 解析手法および手順

原木らは、三次元個別要素法の解析プログラムを作成し、高速載荷を受けるコンクリート円柱供試体の破片飛散シミュレーションを試みており、高速載荷時の荷重-変形関係および破片の飛散現象を良好にシミュレートできることを示している²⁾。原木らの提案する三次元個別要素法による手法をベースとし、原木らの解析モデルにポリウレア樹脂塗膜を模した要素を付加して、解析を試みた。まず、ポリウレア樹脂塗膜のない無補強のコンクリート供試体の高速載荷解析を行い、実験結果と比較して解析パラメータの同定をした後、ポリウレア樹脂塗膜供試体の高速載荷解析を行い、実験結果と比較して、塗膜による効果について検討した。

3. 無補強コンクリート供試体の高速載荷解析

要素の配列モデルは、直径 10mm の球形要素を図-1 に示すように組み上げた細密充填配列である。また、上端の層に接するように平面要素を配置し、実験時と同条件で時間制御される速度で下方に変位を与えて載荷を表現している。

解析パラメータを設定するにあたり、解析に使用したパラメータを表-1 に示す。軟化勾配の補正係数 α_1 , α_2 は、実験に同定して決定する必要がある。図-2 に α_1 , α_2 をパラメトリックに変化させた場合の解析結果を実験値と比較して示す。 $\alpha_1=0.05$, $\alpha_2=0.04$ とすると概ね実験結果を再現できることがわかる。

図-3 に $\alpha_1=0.05$, $\alpha_2=0.04$ の条件で行った解析の飛散状況の一例を示す。大きさにばらつきのある破片が生成し、飛散していることがわかる。

図-4 に無補強供試体の実験結果と解析結果 5 回分の飛散エ

ネルギー～入力エネルギー関係を示す。参考までに、エネルギー変換率 0.9%, 1.6%, 2.3% を表す直線を合わせて示す。なお、エネルギー変換率 1.6% とは、無補強供試体の実験平均値である。飛散エネルギーは 2.6～5.5J の範囲でばらついており、実験結果のばらつきをよく再現している。また、解析結果のエネルギー変換率も、実験結果とほぼ同様の範囲に収まっており、全体として無補強供試体の飛散現象をよく再現できている。

4. ポリウレア樹脂塗膜供試体の高速載荷解析

要素の配列モデルは、無補強供試体解析モデルの側面にポリウレア樹脂要素として、直径 10mm の球形要素をもう 1 重外側に巻き付けたものがある。

隣接する要素間を接続するばねについては、要素の種類の組合せごとに設定する。つまり、コンクリート要素とコンクリート要素間の接続ばね、ポリウレア樹脂要素とポリウレア樹脂要素間の接続ばね、コンクリート要素とポリウレア樹脂要素間の接続ばねの 3 種類をそれぞれ設定する。

表-1 コンクリート解析パラメータ

ばね定数	法線方向 (N/m)	6.88×10^7
	接線方向 (N/m)	3.11×10^7
減衰定数		0.02
粘着力	(N)	95.8
摩擦角	(°)	37.0
引張限界力	(N)	-68.4
引張破壊エネルギー	(J/m ²)	43.0

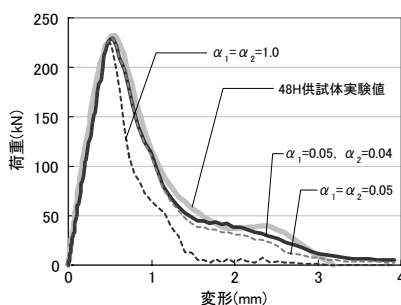


図-2 荷重～変形関係

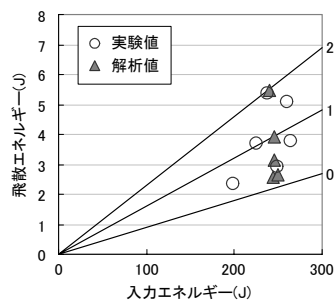


図-3 飛散～入力エネルギー関係

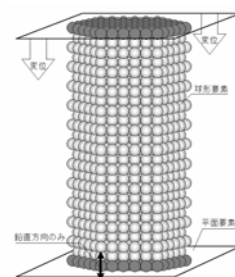


図-1 解析モデル

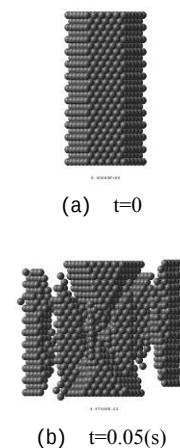


図-4 高速載荷による飛散

キーワード 個別要素法, ポリウレア樹脂, 高速載荷, 飛散抑止

連絡先 〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL:046-841-3810(内 3518)

図-5(a)に のポリウレタ樹脂要素間連接ばね（法線方向）の構成則を示す．事前に実施したポリウレタ樹脂の引張実験より得られた応力 - ひずみ関係に基づき，引張側は降伏点ではばね剛性が変化し，引張限界力に達すると破断するバイリニアモデルとしている．一方，圧縮側は引張初期剛性と同等のばね剛性による弾性モデルとしている．

のコンクリート要素とポリウレタ樹脂要素間連接ばね（法線方向）の構成則は，図-5(b)のように引張側では の構成則に，圧縮側では の構成則に準じた構成則としている．

ポリウレタ樹脂塗膜供試体解析に使用したパラメータを表-2に示す．このパラメータは要素が直線上に配列した場合に成立するものであり，本解析モデルでは，厳密には成立しない．しかし，破片がランダムに発生することからポリウレタ樹脂塗膜が全体に均等に变形するのではなく，局所的に様々な变形をするので，本解析では先のような単純化した算定方法を用いている．

図-6 に塗膜厚を 1mm に設定した解析モデルの破壊挙動の推移を示す．コンクリート要素をポリウレタ樹脂要素による塗膜内にとどめており，実験と同様の飛散片抑止が再現されている．しかし，実験では塗膜厚 1mm の供試体で塗膜が一部破損するものもあったが，解析では破損しておらず，完全には再現できていない．

図-7 に解析で得られた荷重 - 変形関係を実験結果と合わせて示す．実験では，ポリウレタ樹脂塗膜により強度が大きくなることはなかったが，ポリウレタ塗膜解析モデルでは，ピーク荷重が無補強供試体モデルと比較して約 20kN 大きくなっている．ピーク荷重から半分程度軟化したところまでを見ると，解析結果は実験結果と概ね一致している．それ以降の軟化域については，ポリウレタ樹脂塗膜の拘束効果による抵抗力の増加が実験と同様に現れているが，抵抗力増加の割合は実験値の半分程度となっている．また，荷重 - 変形関係における塗膜厚の違いによる差異はほとんど見られない．

図-8 にポリウレタ樹脂要素間に発生した応力の頻度分布を示す．なお，応力は引張を正として表示している．応力 0 付近が最も多くなっており，塗膜厚 1mm と 2mm の結果を比較しても大きさ差異は見られない．また，応力が破断強度に達しているものではなく，降伏応力 2.5N/mm^2 を超えているものでもわずかであり，1mm 厚モデルで 4.7% 2mm 厚モデルで 2.2% となり，大部分が弾性範囲の変形に収まっている．

実験では，一部塗膜が破れる部分も現れており，その点についてはもう少し検討が必要である．

5. 結 言

本研究で得られた成果を以下に示す．

- (1) 無補強供試体の高速載荷解析において，荷重 - 変形関係，飛散エネルギー - 入力エネルギー関係を概ね再現することができた．
- (2) ポリウレタ樹脂塗膜供試体の高速載荷解析における荷重 - 変形関係において，拘束効果により抵抗力が増大する傾向を再現することができた．
- (3) 塗膜に発生する応力の大部分が降伏応力以下となり，塗

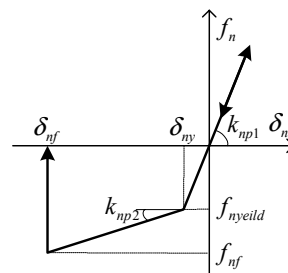
膜の破損まで再現できていないことに関しては，今後の検討が望まれる．

参考文献

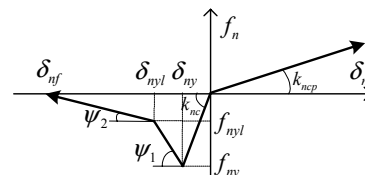
- 1) 足立国明，原木大輔，香月智，福井秀平：供試体の飛散片抑止効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.847-852，2008.
- 2) 原木大輔，香月智，藤掛一典：個別要素法のコンクリート破片飛散シミュレーションへの応用，応用力学論文集，Vol.9，pp.667-678，2006.8.

表-2 ポリウレタ樹脂解析パラメータ

ばね定数	法線方向	降伏前 (N/m)	1.27×10^4
		降伏後 (N/m)	8.14×10^2
	接線方向	(N/m)	0
減衰定数			0.02
降伏力		(N)	22.4
破断伸び		(m)	2.58×10^{-2}

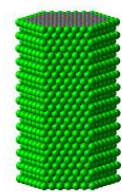


(a) ポリウレタ樹脂要素間

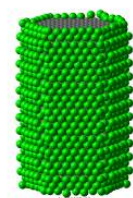


(b) コンクリート - ポリウレタ樹脂要素間

図-5 法線方向ばねの構成則



(a) $t=0$



(b) $t=0.01(s)$

図-6 破壊挙動の推移

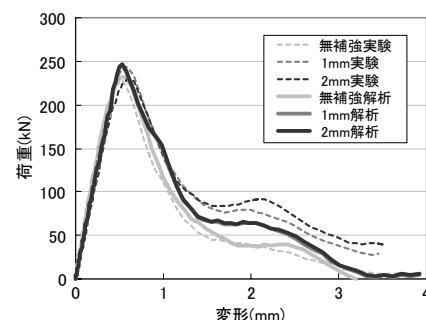


図-7 荷重 - 変形関係（ポリウレタ樹脂塗膜）

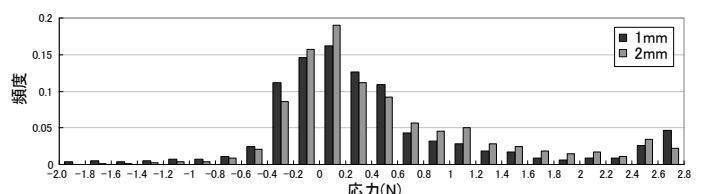


図-8 応力頻度分布