

論文 接触爆発を受けるポリウレア樹脂塗布コンクリート板の耐爆性能に樹脂物性値が及ぼす影響に関する検討

道上 剛幸*1・別府 万寿博*2・市野 宏嘉*3

要旨：本研究は、ポリウレア樹脂を爆発の反対側（裏面）に塗布したコンクリート板に対する接触爆発実験を行い、ポリウレア樹脂塗布 RC 板の耐爆性能へポリウレア樹脂の物性値が及ぼす影響について検討した。物性の異なる 2 種類のポリウレア樹脂を板の裏面に 2mm および 4mm の厚さで塗布し、爆薬量 100g~250g の接触爆発実験を実施した。また、引張試験により樹脂の引張強度および伸び率を計測した。実験結果から、ポリウレア樹脂の塗布により、破壊した破片の飛散を抑制する効果が確認された。また、静的物性値のみでは接触爆発の耐爆性能を適切に評価することができないことを確認した。

キーワード：ポリウレア樹脂, 耐爆性能, コンクリート板, 接触爆発, 物性値

1. はじめに

近年、爆発荷重を受けるコンクリート部材の破壊について研究が進められているが、耐爆性能を確保するための設計法は未だ確立されていない¹⁾。爆破テロや爆発事故では、被害が甚大であるため社会に与える影響が大きく、被害の推定法の確立や防護対策が必要である。特に、接触爆発においては、コンクリート部材に局部破壊が発生し、中でも爆発を受ける面の反対側の面が剥離して破片が飛散する破壊（スポール）を防ぐことが求められる¹⁾²⁾。これらの破壊メカニズムは不明な点が多いが、爆発によってコンクリートの表面側から圧縮応力波が入射されてクレータが生じると説明されている。また、この圧縮応力波が反対側の自由表面（裏面）に達すると自由端反射して引張応力波となり、この引張応力がコンクリートの引張強度を超えるとスポールが発生する。さらに、コンクリート部材に対してより大きな爆発荷重が作用すると、クレータならびにスポールの規模が拡大し、それぞれが接続して貫通が発生する³⁾。このような接触爆発に対して、コンクリート部材の破壊抑制およびスポールや貫通による破片の飛散を防止する方法が様々な研究⁴⁾⁵⁾によって提案されている。その一つにポリウレア樹脂をコンクリート板の裏面へ塗布する方法があり、スポールによる破片の飛散を防止する効果をもたらすことが報告されている²⁾。筆者らも既往の研究⁶⁾とは異なるポリウレア樹脂を裏面に塗布したコンクリート板の接触爆発実験を行い⁷⁾、樹脂の塗膜厚さの違いが耐爆性能の向上効果に与える影響について報告した。さらに、ポリウレア樹脂の物性値が破片飛散抑制効果に及ぼす影響についても検討したが、検討対象が限られていたため、そのことについての説明は今後の課題としていた⁷⁾。

本研究は、コンクリート構造物の耐爆設計法の確立に

資するため、既往の研究⁶⁾⁷⁾とは異なる物性値をもつポリウレア樹脂を裏面に塗布したコンクリート板の接触爆発実験を実施し、ポリウレア樹脂の静的物性値が接触爆発の耐爆性能に及ぼす影響について検討を行った。

2. 接触爆発実験概要

2.1 使用材料

本研究では 2 種類のポリウレア樹脂を使用した。2 種類ともに加温硬化型ポリウレアであり、カタログ値の物性を表-1 に示す。また、表-1 には 5 章で比較検討を行う既往の研究⁶⁾⁷⁾のポリウレア樹脂物性も C, D として記載している。コンクリートは呼び強度 30 のレディーミクスコンクリートを用い、試験時の圧縮強度は 37.2N/mm²、プライマーはエポキシ系樹脂を用いた。表-2 にコンクリートの調配合を示す。

2.2 試験体

図-1 に、実験に用いたコンクリート板試験体の概要を示す。コンクリート板の寸法は縦 500×横 500×厚さ 80mm であり、既往の接触爆発実験研究と同じサイズとした。鉄筋量が局部破壊に及ぼす影響は小さいことが既往の研究⁸⁾において示されているため、ここではコンクリート板が実験作業時に破損することを防ぐ目的で D10 鉄筋をコンクリート板の四周に配置した。ポリウレア樹

表-1 ポリウレア樹脂の物性値

項目	引張強度 (MPa) ASTM D412-C	伸び率 (%) ASTM D412-C
ポリウレア A	20~23	375~450
ポリウレア B	23~27	375~450
ポリウレア C	13.9	276
ポリウレア D	9.9	276

*1 (株) ケー・エフ・シー 開発営業部 開発営業課長 (正会員)

*2 防衛大学校 建設環境工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 防衛大学校 建設環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤
20	9.5	49.5	43.3	153	309	805	1078	2.78

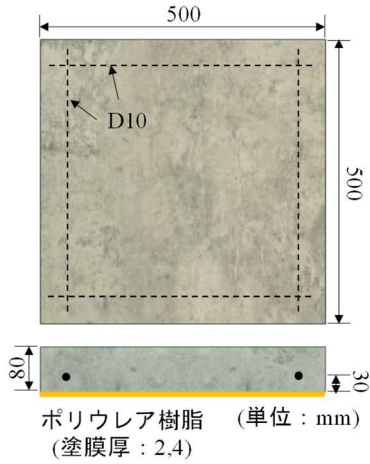


図-1 試験体の寸法

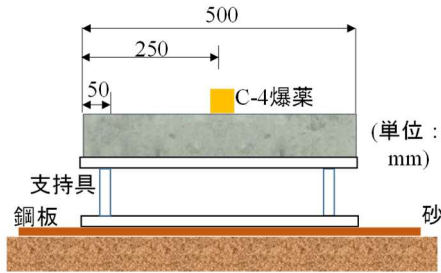


図-2 試験体の設置状況

脂の施工に際しては、コンクリート板施工面をディスクグラインダにより研磨し、プライマー塗布後にポリウレア樹脂を設計塗膜厚さ 2mm および 4mm で吹付施工した。塗膜厚さの管理については、施工時に計測針を塗膜に刺して厚さを確認しながら吹付し、施工後の塗膜厚さは塗膜計で計測した。測定値は試験体四隅および中心の5点とした。設計塗膜 2mm および 4mm に対し、実測の平均値はそれぞれ 2.06mm および 4.12mm であった。

2.3 実験概要

図-2 に試験体と爆薬の設置状況を示す。実験室の地盤を水平に整地して鋼板を敷き、溝形鋼 100×50×5×7.5 を溶接で組み合わせて四角形に加工した支持具を設置した。その上に、図-1 に示すコンクリート板を支持具に各辺 50mm ずつ架かるように設置した。そのため、板のスパンは縦横 400mm となり、計測範囲も同範囲にて行った。試験体の中央に直径と高さの比が等しい円柱状に成形した爆薬を設置し、6号電気雷管で起爆した。実験の爆薬には、Composition C-4 爆薬を用いた。爆薬量はポリウレア樹脂の塗膜厚さに応じて 100~250g とした。

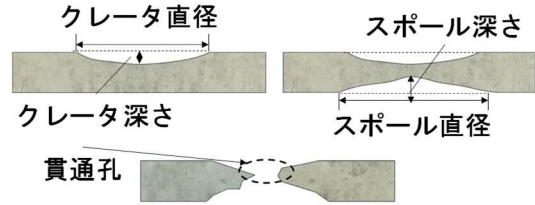
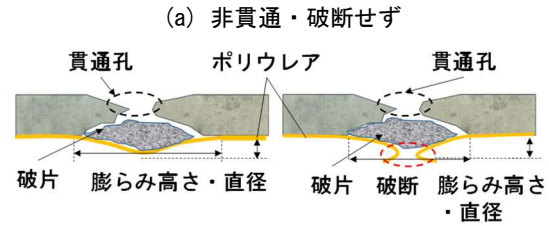
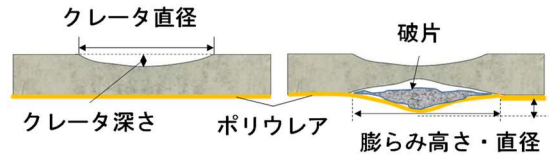


図-3 無補強コンクリートの損傷状態



(a) 非貫通・破断せず (b) 貫通・破断せず (c) 貫通・破断
図-4 ポリウレア塗布コンクリートの損傷状態

2.4 計測項目

図-3 および図-4 に、それぞれコンクリート板が接触爆発によって損傷された状態およびその局部破壊の寸法の定義を示す。今回の実験では対象外となるが、図-3 に無補強コンクリートの損傷状態例を参考として示す。図-4 に示すポリウレア塗布コンクリート板の場合にはポリウレア樹脂を塗布しているため、スポールの発生状況は外観からは確認できないが、樹脂の膨らみ直径をスポールの範囲とした。また、爆薬量が一定値を超えたとき樹脂が破断する。よって、ポリウレア樹脂塗布コンクリート板の破壊形態は、コンクリート板とポリウレア樹脂に分けて分類する。コンクリート板は図-4(a)のような状態を非貫通、図-4(b)および(c)の状態を貫通とし、樹脂については破断の発生有無に区分した。計測項目を図-4 に示す。クラッタ直径、クラッタ深さ、裏面の樹脂の膨らみ高さおよび膨らみ直径である。それぞれの計測は今回定規およびノギスにより計測した。

3. ポリウレア樹脂の力学特性

3.1 試験方法および試験体

ポリウレア樹脂の力学特性が爆発荷重に与える影響について検討するため、引張強度および伸び率を計測した。塗膜厚さ 1mm および 2mm の試験体を吹付により作製して、精密万能試験機（島津製作所 AGS-X）で引張試験を行った。載荷速度は 200mm/min とした。また破断伸び率は、ビデオ式非接触伸び計（島津製作所 TRViewX）で計測した。試験体は JIS K 6251 引張 3 号ダンベルにて硬化後のポリウレア樹脂から供試体を作製し、各厚さに対して 3 回行った。

3.2 試験結果

引張試験結果を表-3 に示す。各樹脂と塗膜厚さごとの供試体数は 3 とした。表には平均値のみ記載している。塗膜厚さ毎の平均引張強度は、ポリウレア樹脂 A の塗膜厚さ 1mm および 2mm に対して、それぞれ 17.9N/mm² および 10.0N/mm² であった。塗膜厚さ 2mm の場合では 1mm と比較して引張強度が 45% 低下した。伸び率においては、塗膜厚さ 2mm の場合は 1mm (378%) と比較して 19% 程度低下し、307% であった。ポリウレア樹脂 B の引張強度は塗膜厚さ 1mm および 2mm に対して、それぞれ 25.7N/mm² および 19.2N/mm² であった。塗膜厚さ 2mm の場合では、1mm と比較して引張強度が 25% 低下した。伸び率では、塗膜厚さ 2mm の場合は 1mm (185%) と比較して 16% 程度増加し、215% であった。塗膜厚さが増加すると引張強度が低下する傾向は既報でも確認されており、吹付施工で供試体を作製しているため供試体の厚みのばらつきや内在する気泡の影響があると考えられる。ちなみに、文献 6) および 7) で使用したポリウレアの引張強度と伸び率は厚さ 2mm で、それぞれ 9.9N/mm²、276% と 13.9N/mm²、276.6% であった。ポリウレア樹脂 A はポリウレア樹脂 B や文献 6) および 7) のポリウレア樹脂と比較すると、引張強度が小さいか同等かつ伸び率が大きいという特性がある。また、ポリウレア樹脂 B はポリウレア樹脂 A や文献 6) および 7) のポリウレア樹脂と比較すると、引張強度が大きいかつ伸び率が小さいという特性がある。

4. 試験体の損傷状況

実験結果を表-4 に示す。表には、全ケースの損傷状態、クレータおよびスポールの直径を示している。直径については、縦、横、斜め 2 箇所合計 4 つを計測し平均した値を示している。図-5 に、試験体の損傷状態の代表例を示す。まず、裏面にポリウレア樹脂 A を塗布したコンクリート板の実験結果について検討する。図-5(a) に示す塗膜厚さ 2mm で補強したコンクリート板、爆薬量 100g の場合、コンクリート板には貫通孔が生じたのに対し、ポリウレア樹脂は破断に至らず、破片の飛

表-3 引張試験結果

ポリウレア樹脂A			
【供試体厚さ1mm】 (設計値)	供試体厚み 実測(mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
平均	1.23	17.9	378.7
【供試体厚さ2mm】 (設計値)	供試体厚み 実測(mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
平均	1.90	10.0	307.3
ポリウレア樹脂B			
【供試体厚さ1mm】 (設計値)	供試体厚み 実測(mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
平均	1.57	25.7	185.4
【供試体厚さ2mm】 (設計値)	供試体厚み 実測(mm)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
平均	2.05	19.2	214.9

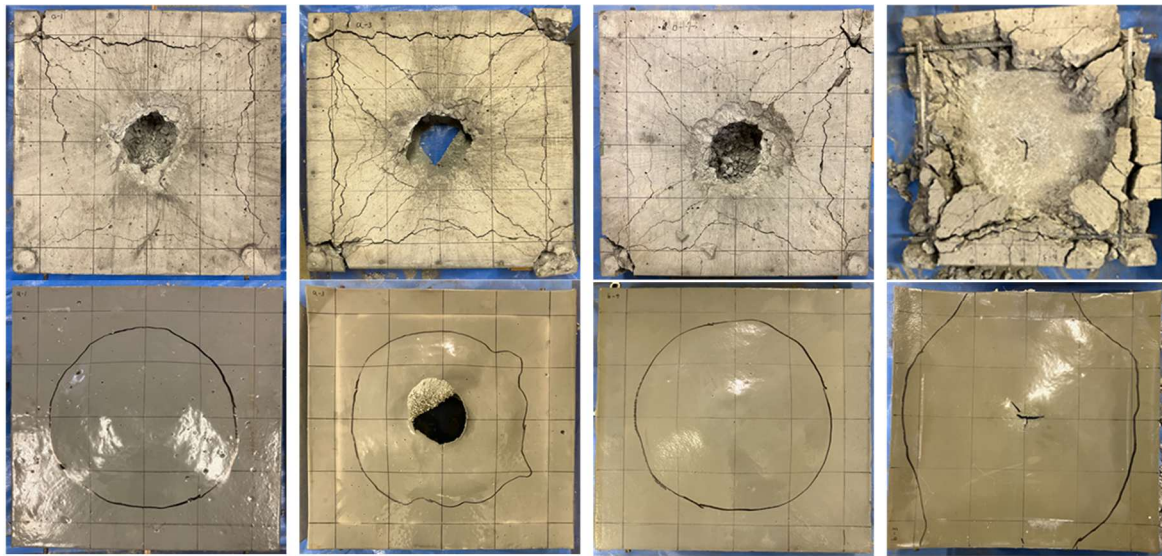
散は生じなかった。裏面の膨らみ直径は 345mm で爆薬量の増大に応じて大きくなり、膨らみ高さは 27mm に達した。さらに爆薬量を 125g へ増加すると、図-5(b) に示すように、膨らみの最頂部でポリウレア塗膜にき裂が生じて破断した。ここで、塗膜厚さを 4mm に増すと、図-5(c) に示すようにポリウレア塗膜の破断は生じることなく膨らみ直径は 369mm、膨らみの高さは 24mm となった。表-4 より、塗膜厚さが 4mm の場合、爆薬量 200g にしても破断は生じず、膨らみ直径が増加し、図-5(d) に示すように、爆薬量 250g で 2mm のとき同様に、ポリウレア塗膜の膨らみの最頂部でき裂が生じて破断する。また、クレータ直径はコンクリート表面が破壊して形成される凹状の損傷領域の直径と定義しているが、その範囲がコンクリート内部の四周に配置した鉄筋位置まで到達しているため、上限値と記載した。

次に、裏面にポリウレア樹脂 B を塗布したコンクリート板の実験について検討する。図-5(e) に、示す塗膜厚さ 2mm で補強したコンクリート板、爆薬量 100g の場合、コンクリート板には先ほどと同様に貫通孔が生じたのに対し、ポリウレア樹脂の破断に至らず、破片の飛散は生じなかった。裏面の膨らみ直径は 368mm で、膨らみの高さは 31mm に達した。さらに爆薬量を増加して 125g とすると、図-5(f) に示すように、膨らみの最頂部でポリウレア樹脂にき裂が生じて破断した。ここで、塗膜厚さ 4mm の場合は、図-5(g) に示すようにポリウレア塗膜の破断は生じず膨らみ直径は 407mm、膨らみ高さは 28mm となった。ポリウレア樹脂 A と同様に、塗膜厚さ 4mm の場合、爆薬量 200g にしても破断は生じず、膨らみ直径が増加し、図-5(h) に示すように、爆薬量 250g でポリウレア塗膜の膨らみの最頂部でき裂が生じて破断した。このように、2 種類のポリウレア樹脂ともに塗膜厚さを増大すると、より大きな爆薬量の爆発に対しても塗膜の破断が生じにくくなる。ただし、(d)、(g)、(h) のように膨らみ直径が大きくなると、その範囲が今回の実験スケール

表-4 実験結果一覧表

NO.	樹脂種類	樹脂厚さ (mm)	爆薬量 (g)	コンクリートの損傷状態	ポリウレタの損傷状態	クレータ	膨らみ(補強板)	
						直径(mm)	高さ(mm)	直径(mm)
1	A	2	100	貫通	破断せず	163	27	345
2	A	2	125	貫通	破断	169	21	351
3	A	2	150	貫通	破断	200	14	416
4	A	4	125	貫通	破断せず	189	24	369
5	A	4	150	貫通	破断せず	217	22	410
6	A	4	200	貫通	破断せず	271	11	414
7	A	4	250	貫通	破断	上限値	12	426
8	B	2	100	貫通	破断せず	199	31	368
9	B	2	125	貫通	破断	187	24	351
10	B	4	125	貫通	破断せず	216	28	407
11	B	4	150	貫通	破断せず	234	18	414
12	B	4	200	貫通	破断せず	228	20	424
13	B	4	250	貫通	破断	242	24	424

※クレータ深さは全てのコンクリート板で貫通のため表記していない

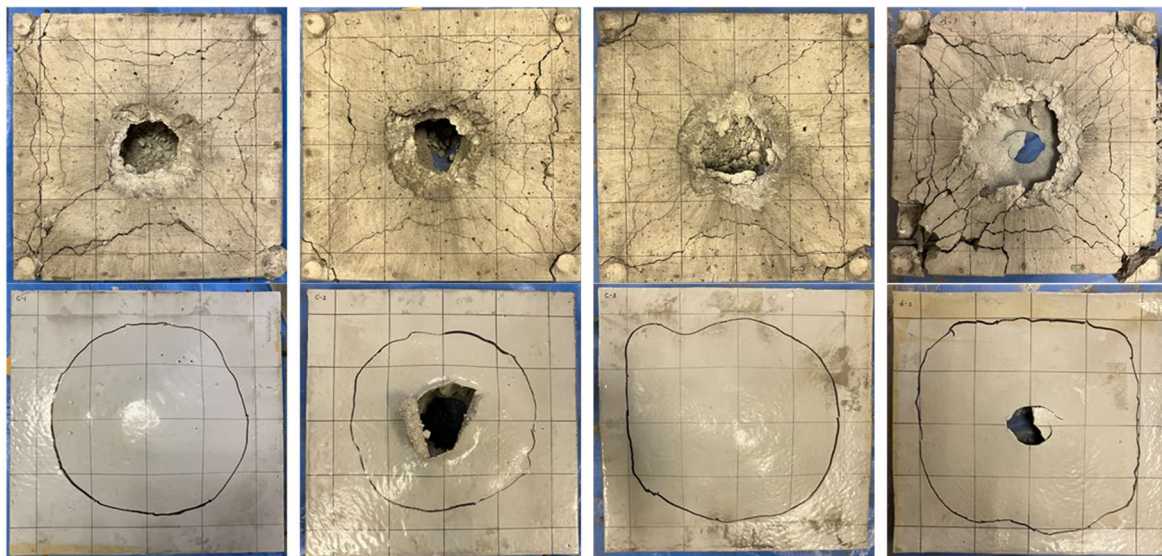


(a)ポリウレタA2mm-爆薬100g

(b)ポリウレタA2mm-爆薬125g

(c)ポリウレタA4mm-爆薬125g

(d)ポリウレタA4mm-爆薬250g



(e)ポリウレタB2mm-爆薬100g

(f)ポリウレタB2mm-爆薬125g

(g)ポリウレタB4mm-爆薬125g

(h)ポリウレタB4mm-爆薬250g

図-5 試験体の損傷状態

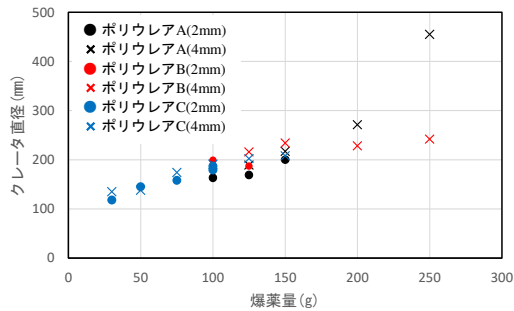


図-6 爆薬量とクレータ直径の関係

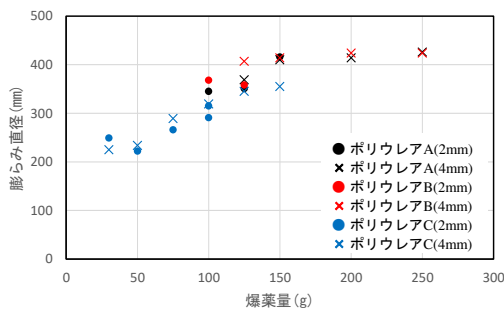


図-7 爆薬量と膨らみ直径の関係

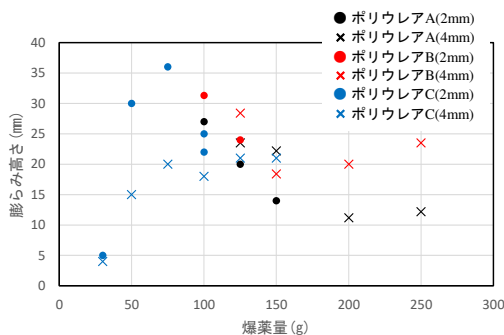


図-8 爆薬量と膨らみ高さの関係

では治具の影響を受けている。今後、コンクリート板の大きさを変えることで正確な膨らみ直径を収集する必要がある。爆薬量の増大に伴う補強コンクリート板の状態変化について検討すると、図-6 より、クレータの直径は爆薬量に対して線形に近い傾向で増大していることがわかる。ただし、クレータ直径はポリウレタ樹脂の塗膜厚さに関わらずほとんど変化しない。なお、図-6~8 に記載するポリウレタ C は著者らの既往の実験⁷⁾で用いたポリウレタである。図-7 より、についても爆薬量の増大に伴い大きくなる傾向がある。図-8 より、膨らみ高さは爆薬量が小さい範囲ではポリウレタ樹脂の塗膜厚さが大きい方が小さくなる傾向にあるが、爆薬量 125g を超える範囲ではポリウレタ樹脂の塗膜厚さが小さい方が膨らみ高さは小さくなる傾向にあり、膨らみ高さは爆薬量の影響を受けることが確認できた。これは、塗膜厚さ 2mm の場合は、ポリウレタ樹脂 A および B ともに爆薬

量 125g の場合に塗膜が破断されたことにより応力が解放されてひずみが小さくなることで膨らみ高さが減少したことが推察される。塗膜厚さ 4mm については、ポリウレタ樹脂 A は爆薬量 125g, 150g では膨らみ高さは 20mm 程度を保持し、爆薬量 200g および塗膜が破断した 250g の場合は、10mm 程度であった。ポリウレタ樹脂 B は爆薬量 125g では膨らみ高さは 28mm であり、爆薬量 150g, 200g および塗膜が破断した 250g を含めて膨らみ高さは 20mm 前後を保持した。

5. 実験結果の検討

5.1 ポリウレタ樹脂による補強効果の評価

ポリウレタ樹脂による耐爆性能における裏面補強の効果、山内らと同様の評価方法⁶⁾で行った。森下ら⁸⁾は、接触爆発を受ける RC 板のスポール限界および貫通限界が以下のように表せることを明らかにしている。

(a) スポール限界

$$T/W^{1/3} = 3.6 \quad (1)$$

(b) 貫通限界

$$T/W^{1/3} = 2.0 \quad (2)$$

ここに、T はコンクリート板厚(cm)、W は爆薬量(g)である。なお、W は爆薬のエネルギーを基準として TNT 爆薬に換算した爆薬量である。C-4 爆薬の爆発エネルギーは TNT の 1.13 倍であるので、本実験では、爆薬量に 1.13 を乗じた値が爆薬量 W となる。また、 $T/W^{1/3}$ を換算コンクリート厚さと呼ぶ。

実験結果から、式(2)で表される RC 版の貫通限界に対する換算コンクリート厚さより小さい場合でも、ポリウレタ樹脂は直ちに破断しない。また、樹脂の塗膜厚さが増大すると、樹脂の破断に必要とする爆薬量も増大する。このことを定量的に表す。ポリウレタ樹脂厚さ 2mm では、爆薬量 100g においてコンクリート板には貫通が生じているものの、ポリウレタ樹脂は破断せず、破片の飛散は生じていない。仮に、C-4 爆薬 100g に対して裏面にポリウレタを塗布しないコンクリート板がスポールを生じないために必要な板厚は、式(1)より 174mm となる。スポールによるコンクリート片の飛散を発生させないという観点からは、本研究に使用したポリウレタ樹脂 2mm の塗布は、少なくとも $174 - 80 = 94$ mm のコンクリート板厚と同等の効果がある。ポリウレタ樹脂 4mm の塗布では、C-4 爆薬 200g でも裏面側への破片の飛散が生じなかった、同様に計算すると少なくとも 139mm のコンクリート板厚と同等の効果がある。今回の実験結果からはスポールによるコンクリート片の飛散を発生させないという観点からは、ポリウレタ A, B 同一の補強効果となる。

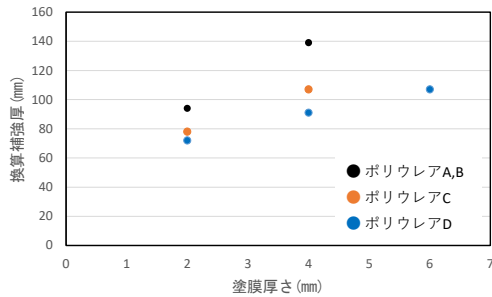


図-9 換算補強効果の比較

5.2 既往の実験結果との比較

ここでは、同じ接触爆発実験を行った山内ら⁶⁾および著者らの既報⁷⁾との比較を行う。著者らの既往の実験で用いたポリウレア樹脂（ポリウレア C）の物性は、引張強度 13.9N/mm²、伸び率 276.6%である。実験では厚さ 80mm のコンクリート板に対して 0, 2 および 4mm の塗布厚とし、爆薬量 20~150g において同様の接触爆発実験を行っている。山内らの裏面塗布の材料として使用したポリウレア樹脂（ポリウレア D）の物性は、引張強度 9.9N/mm²、破断伸び率 276%である。実験では厚さ 60mm のコンクリート板に対して 0, 2, 4, および 6mm の厚さを塗布し、爆薬量 15~100g において同様の接触爆発実験を行っている。試験体の板厚やポリウレアの物性値が異なる既往の研究のポリウレアでも図-6~8 で示した関係性において本実験と同等の結果が得られている。

次に、破片を飛散させない観点から、ポリウレアの換算補強厚を比較した結果を図-9 に示す。図-9 から、ポリウレア樹脂の違いによる補強効果度合いに差異が生じることがわかる。ポリウレアの補強効果、つまり爆薬量に対する破片を飛散させない効果としては、ポリウレア A および B が同等で、次にポリウレア C、その次にポリウレア D という順で大きいことが確認できる。しかし、静的物性値を比較してみると引張強度については、ポリウレア B>C>A≡D となり、伸び率については、ポリウレア A>C≡D>B となる。以上より、ポリウレア樹脂の引張強度や伸び率の静的物性値のみでは接触爆発荷重に対する抵抗性を適切に評価することができないことがわかる。今後の課題として、ひずみ速度が力学特性に与える影響や飛散抑制効果に及ぼす影響について検討する必要がある。

6. まとめ

本研究では、ポリウレア樹脂を裏面塗布したコンクリート板に対して接触爆発を行い、耐爆性能を確認した。本実験条件の範囲で得られた主な結果を以下に示す。

(1) ポリウレア樹脂をコンクリート板の裏面に塗布することで、樹脂塗膜の膨らみを伴いながら、破壊片の飛散

を抑制する効果が得られた。

(2) ポリウレア樹脂を裏面塗布したコンクリート板がある一定の爆薬量を超える接触爆発を受けた場合、ポリウレア樹脂塗膜は、膨らみの最頂部においてき裂が生じて破壊する性状を示した。

(3) 接触爆発に対するコンクリート板の裏面剥離限界実験式を使用して、ポリウレア樹脂が破断しない効果を、コンクリートの厚さに換算することで、ポリウレア樹脂の耐爆性能を数値的に評価でき、設計への応用を示した。

(4) 既往の研究結果も用いて 4 種類のポリウレア樹脂の静的物性値（引張強度、伸び率）の比較を行った結果、静的物性値のみでは接触爆発荷重に対する抵抗性を適切に評価することができないことを確認した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、防衛大学校理工学研究所の森広毅氏、峯好古氏、チンミンチエン氏の協力をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 爆発・衝撃作用を受ける土木構造物の安全性評価—希少事例に備える—, 土木学会, 2017.9
- 2) 爆発作用を受けるコンクリート構造物の安全性評価—評価手法と対策技術—, 防衛施設学会, 2018.9
- 3) 別府万寿博, 大野友則, 大久保一徳, 佐藤和幸: 接触・近接爆発に対する繊維シート補強コンクリート板の耐爆性能, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.700-716, 2010.12
- 4) 別府万寿博, 河野克哉, 岸良竜, 溝口愛実, 市野宏嘉: 接触爆発を受ける繊維補強 PFC パネルの耐爆性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.69A, pp.1176-1186, 2023.3
- 5) 山口信, 森島慎太郎, 張志成, 片山隆: ポリアリレート繊維シートにより裏面補強した鉄筋コンクリート版の接触爆発に対する耐爆性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.739-734, 2018.3
- 6) 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平: ポリウレア樹脂により裏面補強したコンクリート板に対する接触爆発実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.895-900, 2022.6
- 7) 道上剛幸, 別府万寿博, 市野宏嘉: 接触爆発を受けるポリウレア樹脂塗布コンクリート板の耐爆性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.973-978, 2024.6
- 8) 森下政浩, 田中秀明, 安藤智啓, 萩谷浩之: 接触爆発を受ける鉄筋コンクリート版の損傷に及ぼすコンクリート強度及び鉄筋間隔の影響, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.89-98, 2004.5